Journal of Agricultural Economics and Development
Vol. 34, No. 4, Winter 2021, p. 397-419

نشریه اقتصاد و توسعه کشاورزی
جلد ۳۴، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۹، ص. ۴۱۹-۳۹۷

مقاله پژوهشی

بررسی استراتژی‌های تطبیقی برای مدیریت منابع آب کشاورزی تحت تغییر اقلیم در حوضه آبریز رودخانه هلیل‌رود

عباس میرزایی[۱*]- منصور زیبایی[۲]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۳۰
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۰۵

چکیده

به دلیل ماهیت چندبعدی و چند مقیاسی مدیریت آب و تغییر اقلیم، به ادغام ابزارهایی برای تحلیل اثرات و سازگاری نیاز است. در این راستا، در مطالعه‌ی حاضر به منظور ارزیابی اثرات بالقوه تغییر اقلیم و راهبردهای تطبیقی بر کشاورزی آبی در حوضه رودخانه هلیل‌رود از یک مدل با لحاظ مسائل اقتصادی و هیدرولوژیکی استفاده شده است. در این چارچوب، یک مدل بهینه‌یابی چندهدفه اقتصادی مزرعه-بنیان با مدل هیدرولوژیکی WEAP تلفیق شده است که می‌تواند سیستم‌های اجتماعی-اقتصادی، زراعی و هیدرولوژیکی را به شیوه‌ای فضایی و صریح که تمامی ابعاد و مقیاس‌های مربوط به تغییر اقلیم را در بر می‌گیرد، نشان دهد. برای این منظور تعدادی مزرعه نماینده انتخاب و مدل بهینه‌یابی چندهدفه در قالب نرم‌افزار GAMS برای مزارع منتخب اعمال و سپس از نرم‌افزار WEAP و ابزار MABIA برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی سطح حوضه بهره گرفته شد. نتایج حاصل از شبیه سازی سناریوی تغییر اقلیم A2 و برداشت متوازن آب زیرزمینی (سناریوی ترکیبی) بر وضعیت هیدرولوژیکی و اقتصادی سطح حوضه نشان داد که عملکرد محصولات، آب در دسترس و قابلیت اطمینان تأمین تقاضای آب مناطق در مقایسه با سناریوی پایه کاهش، نیاز خالص آبی محصولات و تقاضای آب تأمین نشده مناطق افزایش و درآمد زارعین در افق بلندمدت در مقایسه با سناریوی پایه برای واحدهای بالادست بین ۱۰ تا ۳۷ درصد، میانی بین ۲۴ تا ۴۷ درصد و پایین‌دست بین ۳۰ تا ۵۰ درصد کاهش پیدا می‌کند. اما، بکارگیری اقدامات و راهبردهای تطبیقی مناسب با هر منطقه می‌تواند اثرات تغییر اقلیم بر شرایط هیدرولویکی به ویژه برای مناطق پایین‌دست و بر شرایط اقتصادی به ویژه برای مناطق بالادست را تعدیل کند. در پایان، نتایج اتخاذ ترکیبی از راهبردهای تطبیقی استفاده از سیستم مناسب انتقال آب، سامانه‌های آبیاری مدرن، افزایش کشت محصول زعفران و اعمال کم آبیاری برخی از محصولات به‌صورت همزمان نشان داد که تقاضای آب تأمین نشده در حد زیادی کاهش و بازده برنامه‌ای کل بخش کشاورزی حدود ۶۸ درصد در مقایسه با شرایط پایه تحت تغییر اقلیم افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: استراتژی‌های تطبیقی، تغییر اقلیم، حوضه رودخانه هلیل‌رود، مدل اقتصادی-هیدرولوژیکی

مقدمه

کمبود منابع آب مهم‌ترین مسئله‌ای است که بشر در قرن ۲۱ با آن مواجه می‌باشد (۹، ۲۰ و ۲۱). خشکسالی‌های شدید و تغییرات اقلیمی در دهه‌های اخیر به این مسئله بیشتر دامن زده است و چالش های زیادی را در مقابل برنامه‌ریزان کشورها جهت استفاده پایدار از منابع آب، حفظ محیط زیست و تولید مواد غذایی کافی قرار داده و این امر منجر به یک بحران جهانی شده است (۴۰). تصمیم‌سازان در مناطق خشک و نیمه خشک با انتخاب‌های سختی جهت طراحی سیاست‌های تطبیق با تغییرات اقلیمی روبرو هستند (۱۹). به طور کلی، نیاز است که مدیریت منابع آب و تصمیم‌سازی در زمینه اتخاذ سیاست‌های تطبیق با تغییرات اقلیمی بیشتر به سمت کشاورزی پایدار و کارایی بیشتر تخصیص و مصرف آب انتقال پیدا کند (۱۰).

مدل‌های بهینه‌یابی اقتصادی و اقتصادی-زیست محیطی جهت ارزیابی استراتژی‌های تطبیق به طور گسترده در مطالعات مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است (۳ و ۴۳). این‌گونه مدل‌ها، منافع اقتصادی با و بدون استراتژی‌های تطبیقی را با توجه به مجموعه‌ای از محدودیت‌ها حداکثرسازی و تخصیص آب را برآورد می‌کنند (۴۲). این مدل‌ها دارای وابستگی زمانی هستند، به گونه‌ای که در هر دوره زمانی مسئله بهینه‌یابی مشخص بایستی حل و نتایج تخصیص ارائه شود. همچنین مسائل اقلیمی که بر وضعیت هیدرولوژیکی آب اثرگذار

۱ و ۲- به‌ترتیب دکتری اقتصاد کشاورزی و استاد گروه اقتصاد کشاورزی، دانشگاه شیراز
(*- نویسنده مسئول: Email: mabbas1369@gmail.com)
DOI: 10.22067/jead.2021.17801.0

هستند در این مدل‌ها به خوبی نمایش داده نمی‌شود. در پایان اینکه نتایج این مدل‌ها بصورت ایستا است و شبیه‌سازی از وضعیت هیدرولوژیکی سطح حوضه را نشان نمی‌دهند.

در دهه‌های اخیر، ارزیابی اثرات تغییر اقلیم در بخش کشاورزی بیشتر مبتنی بر مدلسازی بیوفیزیکی با تمرکز بر بعد زراعی (۲۴ و ۳۷) یا بعد هیدرولوژیکی (۱۷ و ۳۰) بوده است. در حالی که مدیریت آب و تغییر اقلیم دارای چندین بعد متفاوت است (۷) که نیاز به نگاه یکپارچه به جنبه‌های بیوفیزیکی و اجتماعی در قالب مفاهیم انسانی و زیست محیطی می‌باشد. در این راستا، انواع متفاوتی از چارچوب‌های مدلسازی اقتصادی–هیدرولوژیکی برای نشان دادن تفاوت مقیاس‌ها (از مزرعه تا سطح حوضه)، ابعاد تغییر اقلیم، منابع آب و کشاورزی (هیدرولوژی، کشاورزی، اجتماعی–اقتصادی) و شرایط زیست محیطی تالاب‌ها توسعه داده شده است. اما در این مدل‌ها کمتر به بعد اجتماعی–اقتصادی مصرف آب و نقش واکنش‌های انسانی به اثرات اقلیمی توجه شده است. بنابراین، مدل‌های اقتصادی–هیدرولوژیکی[1] می‌تواند مباحث اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی مدیریت منابع آب و ارزیابی اثرات تغییر اقلیم را بهتر نشان دهد (۴).

در تعداد زیادی از مطالعات، این‌گونه مدل‌ها در قالب مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی با اهداف حداکثرسازی منافع مصرفی و غیر مصرفی آب شامل منافع کشاورزی، شهری، صنعتی و زیست محیطی و با توجه به شرایط هیدرولوژیکی در طول افق برنامه‌ریزی چند ساله مورد استفاده قرار گرفته و سیاست‌های مدیریتی و استراتژی‌های تطبیقی در سطح حوضه با توجه به این شرایط ارزیابی شده است (۴، ۱۲، ۱۳، ۱۸، ۱۹، ۲۵، ۲۶، ۳۱، ۳۲، ۳۶ و ۳۸). اما نقطه ضعف این مدل‌ها، عدم توجه به شرایط اقلیمی منطقه و تأثیر شرایط اقلیمی بر وضعیت هیدرولوژیکی منطقه است. همچنین در این مدل‌ها، اثرات سیاست‌های مدیریتی و استراتژی‌های تطبیقی در سطح کل حوضه ارزیابی شده است، این در حالی است که هر کشاورز واکنش متفاوتی به این سیاست‌ها دارد و بایستی در سطح مزارع این واکنش‌ها بررسی گردد. مطالعاتی نیز وجود دارند که عملکرد و وضعیت هیدرولوژیکی سطح حوضه را با استفاده از شرایط اقلیمی و وضعیت آب و خاک حوضه شبیه‌سازی کرده‌اند اما مدل بهینه اقتصادی یا اقتصادی–زیست محیطی را به این شبیه‌سازی ارتباط نداده‌اند (۱۴ و ۳۴).

بنابراین، جهت ارزیابی اثرات سیاست‌های مدیریت منابع آب و استراتژی‌های تطبیقی در سطح حوضه، مدل اقتصادی–هیدرولوژیکی جامع که منافع اقتصادی مصرف‌کنندگان آب (شامل کشاورزان و تالاب) را حداکثر و همچنین شرایط الگوی کشت و اقلیم در سطح حوضه را در نظر و اثرات آن بر وضعیت هیدرولوژیکی منطقه و عملکرد محصولات را در بر گیرد، ضروری است (۵، ۶، ۸، ۱۰، ۱۱، ۱۵، ۲۲ و ۲۳). بنابراین، در این مطالعه یک مدل جامع اقتصادی–هیدرولوژیکی با در نظر گرفتن شرایط تالاب، الگوی کشت، اقلیم، آب و خاک سطح حوضه انجام و اثرات تغییر اقلیم و استراتژی‌های تطبیقی کشاورزان با این تغییر مورد ارزیابی قرار گرفت.

در این مطالعه، حوضه آبریز رودخانه هلیل‌رود (حوضه آبریز غرب جازموریان) در استان کرمان به عنوان محدوده‌ی انتخابی جهت بررسی اثرات تغییر اقلیم و اتخاذ راهبردهای تطبیقی کشاورزان انتخاب شده است (شکل ۱). دلیل اول انتخاب این حوضه، کشاورزی گسترده و مصرف بالای آب در دشت جیرفت واقع در این حوضه است. در دشت جیرفت برای مصارف کشاورزی به ترتیب ۱۸۸/۴ و ۸۸۲/۶ میلیون متر مکعب آب سطحی و زیرزمینی برداشت گردیده است که این مصارف باعث کاهش سطح آب زیرزمینی و سطح رودخانه شده است (۲۷). دلیل دوم، کاهش عرضه آب ناشی از بارندگی بسیار کم در سطح حوضه است. به‌طوری‌که متوسط بارندگی سالانه کل حوضه برابر ۲۰۸/۱ میلی‌متر در سال می‌باشد (۲۷). این در حالی است که متوسط بارش سالانه در ایران حدود ۲۵۰ میلی‌متر می باشد. منابع آب در حوضه آبریز رودخانه هلیل‌رود به دلیل خشکسالی و اثرات تغییر اقلیم در دهه‌های اخیر به شدت با کمبود مواجه شده است و میانگین دبی سالانه رودخانه در ایستگاه هیدرومتری کناروئیه در بالا دست سد مخزنی جیرفت از ۱۷/۷ متر مکعب بر ثانیه در دهه‌ی ۱۳۷۰ به ۳/۶ متر مکعب بر ثانیه در دهه‌ی ۱۳۸۰ رسیده است (۲۸). دلیل سوم انتخاب حوضه رودخانه هلیل‌رود، واقع شدن تالاب جازموریان در پایین‌دست آن می‌باشد که پر آب بودن این تالاب سهم بسزایی در کاهش ریزگردهای استان و حتی کشور دارد. بنابراین، نیاز به تطبیق فعالیت‌های اقتصادی کشاورزان مبتنی بر منابع آب در سطح حوضه آبریز رودخانه هلیل الزامی خواهد بود.

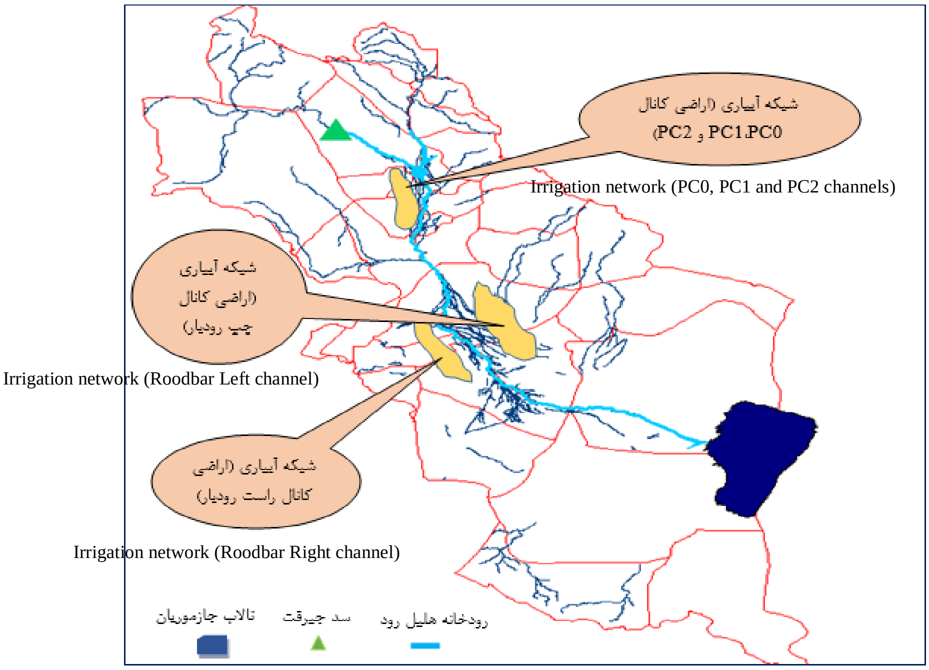
مواد و روش‌ها

مدل اقتصادی–هیدرولوژیکی با حل مدل بهینه‌یابی منافع اقتصادی واحدهای کشاورزی و زیست محیطی با و بدون استراتژی های تطبیقی شروع و الگوهای کشت بهینه و منفعت اقتصادی هر متر مکعب آب در واحدهای کشاورزی استخراج شد. سپس الگوهای کشت بهینه استخراجی در حالت پایه و با اعمال استراتژی‌های تطبیقی و همچنین اولویت تأمین تقاضای آب هریک از واحدها (با توجه به منفعت اقتصادی هر متر مکعب آب) بعنوان ورودی به مدل WEAP[2] وارد و جریان‌های ماهانه برای تأمین تقاضاهای آب در سناریوهای متخلف آب و هوایی شبیه‌سازی گردید. همچنین در مدل WEAP با استفاده از روش MABIA به برآورد نیاز آبی و عملکرد محصولات

1- Hydro-economic models

2- Water Evaluation and Planning

پرداخته شد. در مرحله دوم، میزان آب در دسترس، عملکرد و نیاز آبی محصولات شبیه‌سازی شده در حالت پایه و با اعمال استراتژی‌های تطبیقی تحت شرایط آب و هوایی متفاوت مجدداً در مدل بهینه چندهدفه اقتصادی-زیست محیطی وارد و الگوهای کشت بهینه، میزان تخصیص آب و حداکثر بازده برنامه‌ای زارعین استخراج و در انتها، مدل WEAP با توجه به االگوی کشت بهینه اجرا و به شبیه-سازی شرایط هیدرولوژیکی حوضه پرداخته شد (شکل ۲).



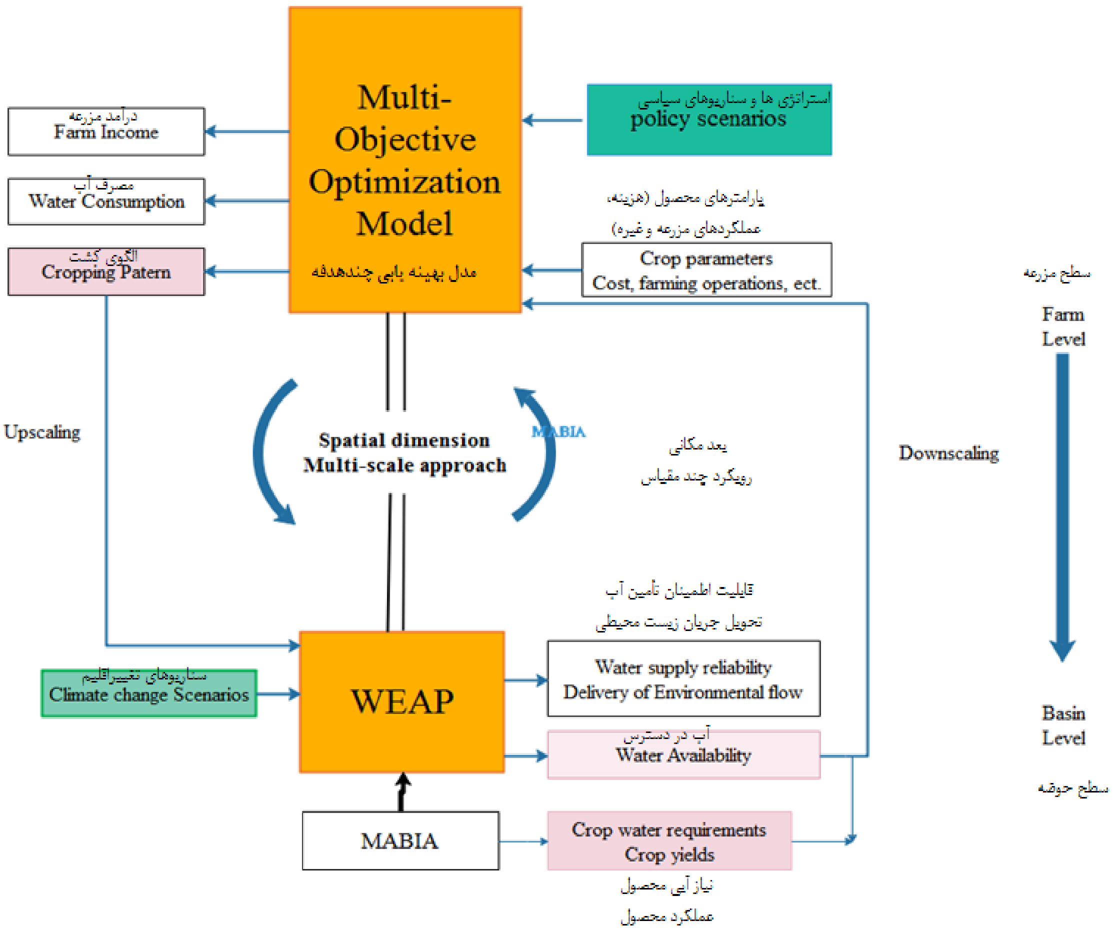
شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه هلیل‌رود

Figure 1- Geographic position of Halil-rud basin

سناریوی تغییر اقلیم در مطالعه‌ی حاضر برگرفته از مطالعه‌ی برخوری و همکاران (۲) است که نتایج آن نشان داد، اثرات سناریوی تغییر اقلیم A2 بر میزان بارش، متوسط حداقل و حداکثر دمای سطح حوضه و میزان حجم جریان آب رودخانه شدیدتر از دو سناریوی دیگر است. این سناریو در سطح حوضه‌ی رودخانه‌ی هلیل‌رود به ترتیب منجر به افزایش ۲/۴ و ۲/۶ درصدی دمای حداقل و حداکثر سالیانه در افق ۲۰۵۰ می‌شود. همچنین میانگین بارش سالیانه برای افق ۲۰۵۰ تحت سناریو A2 نسبت به دوره پایه ۸ میلی متر کاهش خواهد یافت. بنابراین، در مطالعه‌ی حاضر اثرات سناریوی تغییر اقلیم A2 به عنوان بدبینانه‌ترین سناریوی تغییر اقلیمی مورد ارزیابی قرار گرفت. از طرف دیگر، از آنجا که سهم بالایی از مصرف آب در سطح این حوضه مربوط به آب‌های زیرزمینی است و این مصرف بی‌رویه، می‌تواند وضعیت منابع آب زیرزمینی در سال‌های آینده را در شرایط بحرانی قرار دهد به تعادل بخشی سطح ایستابی آبخوان توجه شده است. به منظور تعادل بخشی به آب زیرزمینی منطقه‌ی مورد بررسی باید بین میزان تخلیه و تغذیه‌ی آبخوان، تعادل برقرار باشد. مطالعه‌ی پورسیدی و کشکولی (۲۷) در این منطقه نشان داد که کاهش ۲۰ درصدی تخلیه از آب‌های زیرزمینی می‌تواند برای رسیدن به تعادل موثر باشد. از این‌رو، در مطالعه‌ی حاضر برای شبیه‌سازی وضعیت هیدرولوژیکی حوضه مورد نظر، کاهش ۲۰ درصدی تخلیه از آب زیرزمینی در مدل در نظر گرفته شده است. استراتژی‌های تطبیقی مورد بررسی در مطالعه‌ی حاضر برگرفته از مرور مطالعات گذشته، وضعیت موجود سطح حوضه‌ی آبریز رودخانه‌ی هلیل‌رود و راهکارهای برنامه ششم توسعه برای مقابله با کم آبی می‌باشد که عبارتند از:

الف) استراتژی پایه (p): وضعیت زراعی در سال زراعی ۱۳۹۷-۱۳۹۶ تحت سیاست‌ها و شرایط آبیاری موجود

ب) استراتژی‌های افزایش راندمان آبیاری شامل استراتژی بهبود راندمان انتقال آب به مزارع (s1) از طریق استفاده از کانال‌های بتنی، پوشش انهار و شبکه آبیاری و استراتژی تغییر تکنولوژی آبیاری و استفاده از سامانه‌های آبیاری مدرن (s2) می‌باشد که استفاده از سامانه‌های آبیاری نوین جهت افزایش کارایی و راندمان مصرف آب از جمله اولویت‌های اصلی برنامه ششم توسعه جهت مقابله با کم آبی در کشور است.



شکل ۲- چارچوب مدل اقتصادی-هیدرولوژیکی (استیو و همکاران، ۲۰۱۵)

Figure 2- Framework of hydrological-economic model (Esteve et al., 2015)

ج) استراتژی‌های اصلاح و تغییر الگوی کشت که شامل استراتژی اضافه کردن محصول زعفران به الگوی کشت (s3) و استراتژی افزایش کشت محصول کنجد در منطقه (s4) می‌باشد. در یک سال اخیر سازمان جهاد کشاورزی جنوب استان کرمان، ترویج کاشت زعفران و جایگزینی این محصول با سایر محصولات پر مصرف در آب و تحقیقات میدانی برای شناسایی ارقام سازگار این محصول با منطقه را یکی از اولویت‌های اصلی خود قرار داده است (۱). همچنین، اجرای طرح ملی آبادانی شهرستان قلعه گنج به‌عنوان یکی از شهرستان‌های حوضه‌ی آبریز رودخانه‌ی هلیلرود توسط بنیاد علوی طی سال‌های اخیر، زمینه ساز توسعه‌ی این شهرستان که آب شده است. از جمله راهکارهای این طرح، راه اندازی کارخانه تولید روغن کنجد در این شهرستان است که خرید کنجد به‌عنوان یک محصول با مصرف آب پایین از مزارع را تضمین کرده است. لذا، افزایش کشت این محصول در سطح حوضه یکی از اولویت‌های اصلی در جهت بهبود بهره‌وری اقتصادی آب تلقی می‌شود.

د) استراتژی‌های کم‌آبیاری (s5) که شامل کاهش آبیاری محصولات گندم، گوجه فرنگی و یونجه می‌باشد. میانگین مصرف آب این محصولات در سطح منطقه بالاتر از حد نرمال مصارف آب در مناطق با شرایط آب و هوایی مشابه با این منطقه در کشور می‌باشد. در این راستا، کاهش آبیاری ۲۰ درصدی این محصولات (با توجه به اختلاف مصرف آب این منطقه با میانگین سایر مناطق با شرایط آب و هوایی تقریباً مشابه) در مرحله‌ی غیر حساس رشد آن‌ها اعمال شده است.

مدل بهینه‌یابی چندهدفه اقتصادی-زیست محیطی

مدل بهینه‌یابی مطالعه‌ی حاضر یک مدل بهینه‌یابی برنامه‌ریزی ریاضی خطی دو هدفه با اهداف حداکثرسازی بازده برنامه‌ای کشاورزان (هدف اقتصادی) و حداقل‌سازی مصرف آب جهت ذخیره آن برای استفاده‌ی تالاب جازموریان (هدف زیست محیطی) می‌باشد. در این مدل، ترکیب بهینه تخصیص زمین (Xc,r) به محصولات (c) و تکنیک‌های آبیاری مختلف (r) از حداکثرسازی بازده برنامه‌ای زارع و حداقل‌سازی مصرف آب برای تأمین نیازهای زیست محیطی تالاب

جازموریان با توجه به محدودیت‌های فنی و ساختاری و سیاسی بدست می‌آید. توابع هدف به‌صورت روابط زیر تعریف شده است.

(۱)

$$\max Z_1 = \sum_c \sum_r p_c.y_{c,r}.X_{c,r} - \sum_c \sum_r tc_{c,r}.X_{c,r} - \sum_c \sum_r wp.(nw_c/ef_r).X_{c,r}$$

$$\min Z_2 = \sum_c \sum_r (nw_c/ef_r).X_{c,r} \quad (۲)$$

پارامترهای مدل شامل p_c قیمت هر واحد محصول (c)، $y_{c,r}$ عملکرد محصول تولیدی (c) با تکنولوژی آبیاری (r) در واحد سطح، $tc_{c,r}$ هزینه تولید بدون هزینه آب محصول (c) با تکنولوژی آبیاری (r) در واحد سطح، wp قیمت هر واحد مصرف آب، nw_c مصرف آب خالص محصول (c) در واحد سطح، ef_r کارایی تکنولوژی آبیاری (r) و متغیرهای مدل شامل $X_{c,r}$ متغیر تصمیم سطح زیر کشت محصول (c) با تکنولوژی (r)، Z_1 متغیر بازده برنامه‌ای زارع و Z_2 متغیر میزان مصرف آب می‌باشد. توابع هدف با توجه به محدودیت‌های زمین در دسترس (land)، میزان سرمایه در دسترس (capital) و میزان آب در دسترس (Water) بهینه‌یابی شده است که پارامتر ic_r میزان هزینه تولید هر واحد محصول r در واحد سطح می‌باشد.

$$\sum_c \sum_r X_{c,r} \le land \quad (۳)$$

$$\sum_r \sum_c ic_r.X_{c,r} \le capital \quad (۴)$$

$$\sum_c \sum_r (nw_c/ef_r).X_{c,r} = Water \quad (۵)$$

در مطالعه‌ی حاضر از روش ε-constraint تعمیم‌یافته در قالب نرم‌افزار GAMS برای حل مدل برنامه‌ریزی چندهدفه بهره گرفته شد. در این روش هر بار یکی از توابع هدف بهینه شده و سایر توابع به‌عنوان محدودیت یا تنگنا به مدل افزوده می‌شوند. با تغییر در مقدار تنگنای سمت راست هر یک از هدف‌های مقید شده می‌توان به مجموعه‌ای از پاسخ‌های بهینه پارتو دست یافت (۱۶). یکی از مزیت های این روش این است که بر خلاف نسخه قدیم روش مقید، مجموعه جواب‌های کارای قوی را استخراج و جواب‌های کارای ضعیف را حذف می‌کند. برای این کار، این روش تنگناهای تابع هدف را از حالت نامعادله به معادله تبدیل می‌کند که بدین منظور از متغیرهای مازاد یا کمبود (متغیر s) بهره گرفته شده است.

$$\begin{aligned}
&\max(Z_h(x_1,x_2,...,x_n) + eps(s_1+s_2+...+s_{h-1}+s_{h+1}+...+s_k))\\
&Z_1(x_1,x_2,...,x_n) - s_1 = e_1\\
&Z_2(x_1,x_2,...,x_n) - s_2 = e_2\\
&\vdots\\
&Z_{h-1}(x_1,x_2,...,x_n) - s_{h-1} = e_{h-1}\\
&Z_{h+1}(x_1,x_2,...,x_n) - s_{h+1} = e_{h+1}\\
&\vdots\\
&Z_k(x_1,x_2,...,x_n) - s_k = e_k
\end{aligned} \quad (۶)$$

که در آن Z بردار تابع هدف و Z_i توابع هدف انفرادی، k تعداد توابع هدف، n تعداد محصولات منتخب و X_j سطح زیر کشت اختصاص داده شده به محصول jام است. مقادیر eها در روابط فوق پارامتریک و eps نیز یک مقدار خیلی ناچیز (معمولاً بین 10^{-3} و 10^{-6}) می‌باشد. ویژگی مدل فوق این است که حل آن جواب‌های کارای ضعیف را تولید نمی‌کند. همچنین در این روش برای جلوگیری از مسئله مقیاس اندازه‌گیری به جای متغیرهای si در تابع هدف از s_i/r_i استفاده می‌شود که r_i دامنه‌ای از تابع هدف iام است (فاصله بدترین و بهترین مقدار هدف مورد نظر). بنابراین، تابع هدف به‌صورت زیر تغییر یافته است.

(۷)

$$\max(Z_h(x_1,x_2,...,x_n) + eps(\frac{s_1}{r_1}+\frac{s_2}{r_2}+...+\frac{s_{h-1}}{r_{h-1}}+\frac{s_{h+1}}{r_{h+1}}+...+\frac{s_k}{r_k}))$$

پس از حل مدل، از بین جواب‌های کارای پارتو می‌توان با توجه به نظرات و دیدگاه‌های مختلف بین تصمیم‌گیران و ذینفعان، بهترین جواب را انتخاب کرد که برای این منظور، روش TOPSIS[1] مورد استفاده قرار گرفته است. این روش، یک روش آسان برای رتبه‌بندی گزینه‌های موجود براساس معیارهای مختلف می‌باشد. این روش که کوتاه‌ترین فاصله از نقطه ایده‌آل را به‌عنوان بهترین گزینه انتخاب می‌کند، جزء دسته روش‌های مصالحه‌ای یا توافقی[2] است که در ابتدا، برای معیارهای حداکثر بهتر، بیشترین ارزش و برای معیارهای حداقل بهتر، کمترین ارزش به‌عنوان آلترناتیو ایده‌آل (نقاط ایده‌آل)[3] و برای معیارهای حداکثر بهتر، کمترین ارزش و برای معیارهای حداقل بهتر، بیشترین ارزش به‌عنوان آلترناتیو آنتی ایده‌آل (نقاط آنتی ایده‌آل)[4] شناخته می‌شوند. بنابراین، پس از استخراج مجموع جواب‌های کارای قوی، مجموعه‌ی جواب‌ها به‌عنوان آلترناتیو و دو هدف اقتصادی (حداکثر بازده برنامه‌ای) و زیست محیطی (حداقل مصرف آب جهت ذخیره‌سازی آن برای تالاب) به‌عنوان معیارهای مدل در نظر گرفته می‌شوند. از آنجا که هدف اقتصادی حداکثرسازی و هدف زیست محیطی حداقل‌سازی است، لذا آلترناتیو ایده‌آل بیشترین مقدار معیار اقتصادی و کمترین مقدار معیار زیست محیطی را دارا است و آلترناتیو آنتی ایده‌آل عکس آن است.

$$A^+ = \{A_1^+, A_2^+, ..., A_j^+\} \quad (۸)$$

$$A^- = \{A_1^-, A_2^-, ..., A_j^-\} \quad (۹)$$

در ادامه، فاصله هر جواب (آلترناتیو) از جواب ایده‌آل (آلترناتیو ایده‌آل) و جواب آنتی ایده‌آل (آلترناتیو آنتی ایده‌آل) محاسبه و شاخص نزدیکی مربوط به هر آلترناتیو از طریق رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود.

1- Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
2- Compromise programming
3- Ideal
4- Anti-Ideal

$$CI = \frac{(R)^-}{(R)^+ + (R)^-} \quad (۱۰)$$

که R^-، فاصله هر آلترناتیو از آلترناتیو آنتی ایده‌آل و R^+، فاصله هر آلترناتیو از آلترناتیو ایده‌آل می‌باشد. در نهایت هر آلترناتیو یا جواب که CI بزرگتری داشته باشد به‌عنوان بهترین آلترناتیو (بهترین جواب) انتخاب می‌شود. پارامترهای مدل شامل قیمت‌ها، میزان آب مورد نیاز محصول، کل میزان آب در دسترس، هزینه نهاده‌ها و عملکردهای محصول از سازمان آب منطقه‌ای کرمان بصورت مجموعه‌ای از گزارش‌های آبیاری و زهکشی، جهاد کشاورزی جنوب استان کرمان و همچنین یک نمونه‌ی با ۳۶۶ زمین زراعی استخراج گردید. از آنجا که تحلیل مدل اقتصادی-زیست محیطی مطالعه‌ی حاضر در سطح مزرعه صورت می‌گیرد، تعدادی مزرعه نماینده از نمونه مورد نظر جهت اجرای مدل اقتصادی- زیست محیطی انتخاب گردید. انتخاب مزرعه نماینده برای هر واحد زراعی به صورت مجزا و با توجه به اندازه مزرعه، میزان آب مصرفی، ترکیب کشت و سیستم آبیاری مورد استفاده صورت گرفت.

مدل شبیه‌سازی هیدرولوژیکی (WEAP)

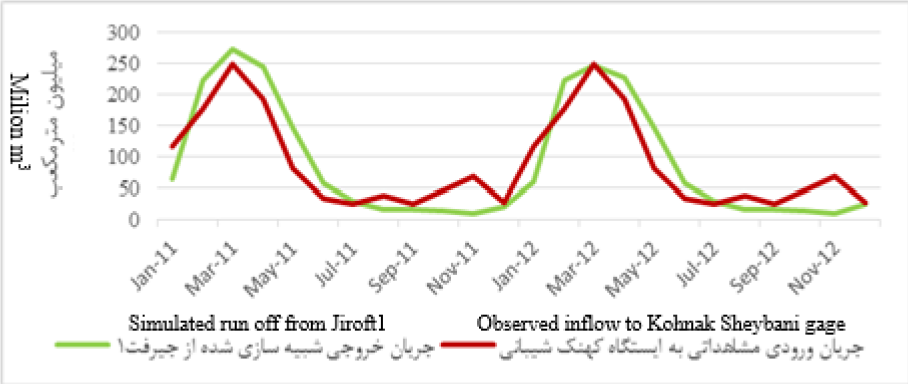
مدل WEAP یک ابزار برنامه‌ریزی منابع آب است که بر اصل بیلان آب استوار می‌باشد و زیرحوضه‌های مختلف، گره‌های تقاضای آب، زیرساخت‌ها، جریان‌های آب و کانال‌های انتقال آب که همگی با یکدیگر مرتبط هستند را نشان می‌دهد (۴۱). این مدل، مولفه‌هایی از چرخه‌ی هیدرولوژیکی را بوسیله‌ی شبیه‌سازی فرایندهای بارش-رواناب[1] در سطح حوضه و با استفاده از سری‌های زمانی داده‌های آب و هوایی محاسبه می‌کند. هر واحد زیر حوضه به کلاس‌های کاربری زمین مختلف تقسیم‌بندی و توازن آب تحت شرایط آب و هوایی آن زیر حوضه محاسبه می‌شود. در این مدل برای هر واحد کشاورزی توابع تجربی جهت توصیف و شبیه‌سازی تبخیر و تعرق، رواناب و جریان‌های سطحی، تغییر در رطوبت خاک، روند جریان پایه به رودخانه و نفوذ عمقی به آب زیرزمینی بکار گرفته می‌شود (۳۳) که روش MABIA موجود در نرم افزار WEAP ابزاری مناسب جهت شبیه‌سازی این‌گونه متغیرها می‌باشد. این روش نیازهای آبی و عملکرد محصولات را شبیه‌سازی و به کاربران اجازه می‌دهد که اثرات تغییرات آب و هوایی و آب در دسترس بر رشد محصول را در نظر بگیرند. اگرچه این روش، اثرات آلودگی CO_2 بر محصولات را نمی‌تواند ارزیابی کند. زیرحوضه‌ها یا واحدهای کشاورزی[2] برای شبیه سازی حوضه‌ی رودخانه‌ی هلیل‌رود مبتنی بر طرح مطالعات زیست محیطی، منابع و مصارف حوضه غرب جازموریان با رویکردی سیستمی (۲۸) می‌باشد. واحدهای کشاورزی مشخص شده در این مدل شامل واحدهای بالادست حوضه (اراضی دره هلیل، احیا و جهاد) و واحدهای میانی حوضه (اراضی کانال PC1، کانال PC2 و جیرفت ۱) و واحدهای پایین‌دست حوضه (اراضی کانال راست و چپ رودبار) می‌باشد.

برای شبیه‌سازی فرایندهای بارش-رواناب از نرم افزار WEAP و از داده‌های آب و هوایی ماهانه طی دوره زمانی ۱۳۹۷-۱۳۸۰ از جمله میزان بارش، درجه حرارت، میزان رطوبت نسبی، سرعت باد و تابش خورشید استفاده شد که از گزارشات ایستگاه‌های هواشناسی سطح حوضه بدست آمده است. همچنین، داده‌های مربوط به پارامترهای خاک از طرح مطالعات زیست محیطی، منابع و مصارف حوضه غرب جازموریان با رویکردی سیستمی و جامع‌نگر که توسط شرکت مهندسین مشاور یکم صورت گرفته، استخراج شد. پارامترهای مربوط به محصولات و آبیاری از سازمان جهاد کشاورزی استان کرمان و همچنین گزارشات مطالعات آبیاری و زهکشی به دست آمده است. جهت ارزیابی اعتبار سنجی مدل مورد استفاده در نرم افزار WEAP از ابزاری به نام PEST بهره گرفته شده است. PEST به کاربران اجازه می‌دهد به طور خودکار فرایند مقایسه خروجی مدل با داده‌های مشاهداتی و اصلاح پارامترهای مدل در جهت افزایش دقت کالیبراسیون مدل را انجام دهد. در این ابزار از داده‌های مشاهداتی حجم جریان آب در ایستگاه‌های هیدرومتری و اطلاعات حجم مخزن به منظور بررسی دقت شبیه‌سازی و فرایند کالیبراسیون بهره گرفته می‌شود.

نتایج

در مطالعه‌ی حاضر، برای ارزیابی اعتبار سنجی شبیه‌سازی و کالیبراسیون مدل از داده‌های مشاهداتی ماهانه حجم جریان آب ورودی به ایستگاه هیدرومتری کهنک شیبانی طی سال‌های ۲۰۱۲-۲۰۱۱ (داده‌های مشاهداتی موجود) و مقایسه آن با خروجی جریان آب شبیه‌سازی شده از اراضی جیرفت ۱ واقع قبل از ایستگاه هیدرومتری کهنک شیبانی بهره گرفته شده است (شکل ۳). مقایسه‌ی حجم جریان آب خروجی شبیه سازی شده از اراضی جیرفت ۱ با داده‌های مشاهداتی حجم جریان آب ورودی به ایستگاه هیدرومتری کهنک شیبانی طی سال‌های ۲۰۱۲-۲۰۱۱ نشان می‌دهد که کالیبراسیون مدل با دقت بالایی صورت گرفته است؛ چراکه، تقریباً روند جریان خروجی شبیه‌سازی شده از اراضی جیرفت ۱، بالادست ایستگاه هیدرومتری کهنک شیبانی با روند مشاهدات واقعی جریان ورودی به ایستگاه هیدرومتری کهنک شیبانی منطبق می‌باشد.

1- Rainfall-Runoff
2- Catchment



شکل ۳- مقایسه داده‌های مشاهداتی جریان رودخانه با داده‌های شبیه‌سازی

Figure 3- Comparison of river flow observed data with simulation data

ارزیابی اثرات تغییر اقلیم

الگوی کشت تحت شرایط پایه در نرم افزار WEAP برای مناطق مختلف اعمال و با استفاده از ابزار MABIA، نیاز خالص آبی محصولات، میزان آب در دسترس مناطق و عملکرد محصولات با و بدون سناریوی تغییر اقلیم A2 در طول دوره‌ی ۲۰۵۰-۲۰۱۱ شبیه سازی گردید. نتایج ارائه شده در جدول ۱ نشان می‌دهد که تغییر اقلیم، میزان آب آبیاری مورد نیاز محصولات مختلف را افزایش خواهد داد که این افزایش برای محصولات جالیزی بیشتر از سایر محصولات می‌باشد. به‌گونه‌ای‌که میزان آب آبیاری دو محصول خیار و گوجه فرنگی به ترتیب ۳۲ و ۲۲ درصد در طول دوره‌ی شبیه‌سازی در اثر تغییر اقلیم افزایش خواهد یافت. کمترین اثر تغییر اقلیم بر نیاز خالص آبی، به محصولات مرکبات، گندم، جو و یونجه اختصاص دارد. نتایج جدول ۲ بیانگر آن است که تغییر اقلیم باعث کاهش میزان آب در دسترس تمامی واحدهای کشاورزی می‌شود.

جدول ۱- اثر سناریوی تغییر اقلیم A2 بر متوسط نیاز خالص آبی محصولات طی دوره‌ی ۲۰۵۰-۲۰۱۱

Table 1- Effect of A2 climate change scenario on crops net water requirement during 2011-2050

محصولات crops	متوسط نیاز آبی خالص تحت تعادل بخشی (متر مکعب در هکتار) Net water requirement average under counterbalance	متوسط نیاز آبی خالص با تغییر اقلیم و تحت تعادل بخشی (متر مکعب در هکتار) Net water requirement average with climate change and under counterbalance	درصد تغییرات نیاز آبی خالص (درصد) Percentage of net water requirement changes
گندم Wheat	3605	3696	+3
جو Barley	2305	2381	+3
هندوانه Watermelon	5676	6539	+16
خیار Cucumber	3436	4525	+32
سیب زمینی Potato	3562	4095	+15
گوجه فرنگی Tomato	5555	6805	+23
یونجه Alfalfa	18000	18901	+5
مرکبات Citrus	13255	13511	+2

ماخذ: یافته‌های تحقیق

Source: Research findings

جدول ۲- اثر سناریوی تغییر اقلیم A2 بر میزان آب در دسترس مناطق مختلف طی دوره‌ی ۲۰۵۰-۲۰۱۱

Table 2- Effect of A2 climate change scenario on available water of different areas during 2011-2050

واحدهای کشاورزی Agricultural units	میزان آب در دسترس تحت تعادل بخشی (متر مکعب در هکتار) Available water under counterbalance	میزان آب در دسترس با تغییر اقلیم تحت تعادل بخشی (متر مکعب در هکتار) Available water with climate change under counterbalance	درصد تغییرات میزان آب در دسترس (درصد) Percentage of available water changes
دره هلیل Dareh-halil	11166	10177	-9
احیا Ehya	11892	11627	-2
جهاد Jahad	10819	10224	-5
PC1 PC1 channel	8690	4713	-46
PC2 PC2 channel	9239	4196	-55
جیرفت ۱ Jiroft1	9329	3952	-58
رودبار چپ Left Roodbar	6772	3069	-55
رودبار راست Right Roodbar	6886	1723	-75

ماخذ: یافته‌های تحقیق
Source: Research findings

جدول ۳- اثر سناریوی تغییر اقلیم A2 بر متوسط عملکرد محصولات طی دوره‌ی ۲۰۵۰-۲۰۱۱
Table 3- Effect of A2 climate change scenario on average of crops yield during 2011-2050

محصولات crops	متوسط عملکرد تحت تعادل بخشی (کیلوگرم) Yield average under counterbalance	متوسط عملکرد با تغییر اقلیم و تحت تعادل بخشی (کیلوگرم) Yield average with climate change under counterbalance	درصد تغییرات عملکرد (درصد) Percentage of yield changes
گندم Wheat	5520	4489	-19
جو Barley	4125	3652	-11
هندوانه Watermelon	29733	23069	-22
خیار Cucumber	19199	15114	-21
سیب زمینی Potato	34195	26751	-22
گوجه فرنگی Tomato	38613	30566	-21
یونجه Alfalfa	10163	9911	-2
مرکبات Citrus	17012	15781	-7

ماخذ: یافته‌های تحقیق
Source: Research findings

واحد کشاورزی رودبار راست به‌عنوان منطقه‌ی پایین‌دست حوضه، بیشترین کاهش آب در دسترس (۷۵- درصد) در اثر تغییر اقلیم را متحمل خواهد شد. اما، نتایج نشان می‌دهد که تغییر اقلیم، میزان آب در دسترس واحدهای کشاورزی بالادست (شامل دره هلیل، احیا و جهاد) در مقایسه با سایر واحدهای سطح حوضه را چندان کاهش نخواهد داد. نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که عملکرد تمامی

محصولات بر اثر تغییر اقلیم کاهش خواهد یافت. بیشترین میزان کاهش عملکرد مربوط به محصولات هندوانه، سیب‌زمینی، خیار و گوجه فرنگی می‌باشد و کمترین میزان کاهش عملکرد به محصولات یونجه و مرکبات اختصاص دارد. بنابراین، با استفاده از نتایج به‌دست آمده می‌توان گفت که محصولات خیار سبز، گوجه فرنگی، هندوانه و سیب زمینی به دلیل کاهش عملکرد و افزایش نیاز خالص آبی شدید، محصولات حساس‌تری در شرایط تغییر اقلیم می‌باشند.

جدول ٤- تقاضای تأمین نشده آب واحدهای کشاورزی بالادست، میانی و پایین‌دست تحت سناریوی تغییر اقلیم

Table 4- Water unmet demand of upstream, middle and downstream agricultural units under climate change scenario

واحدهای کشاورزی Agricultural units	تقاضای تأمین نشده آب در سال ۲۰۵۰ (میلیون مترمکعب) Water unmet demand in 2050 year (MCM)	نسبت تقاضای تأمین نشده آب به کل تقاضای آب در سال ۲۰۵۰ (درصد) Water unmet demand to water demand total ratio in 2050 year (%)
دره هلیل Dareh-halil	1.320	17
احیا Ehya	2.2	16
جهاد Jahad	0.4	3
PC1 PC1 channel	70	55
PC2 PC2 channel	60	57
جیرفت ۱ Jiroft1	89	27
رودبار چپ Left Roodbar	836	96
رودبار راست Right Roodbar	114	95

ماخذ: یافته‌های تحقیق

Source: Research findings

نتایج نشان می‌دهد که در پایان سال ۲۰۵۰، تقاضای تأمین نشده آب برای واحدهای کشاورزی دره هلیل، احیا و جهاد به ترتیب به حدود ۱/۳، ۲/۲ و ۰/۴ میلیون متر مکعب خواهد رسید. از طرف دیگر، می‌توان گفت که به ترتیب حدود ۱۷، ۱۶ و ۳ درصد تقاضای آب واحدهای کشاورزی دره هلیل، احیا و جهاد در سال ۲۰۵۰ و تحت شرایط تغییر اقلیم، تأمین نخواهد شد. بنابراین، در صورت بروز پدیده ی تغییر اقلیم، به طور میانگین حدود ۱۲ درصد از تقاضای آب این واحدها بدون پاسخ خواهد ماند. در پایان سال ۲۰۵۰، تقاضای تأمین نشده آب واحدهای کشاورزی جیرفت ۱، PC1 و PC2 به ترتیب به حدود ۸۹، ۷۰ و ۶۰ میلیون مترمکعب خواهد رسید که این میزان از تقاضای تأمین نشده آب در سال ۲۰۵۰ به ترتیب حدود ۲۷، ۵۵ و ۵۷ درصد کل میزان تقاضای آب آن‌ها می‌باشد. یعنی در سال ۲۰۵۰ و تحت شرایط تغییر اقلیم، به طور میانگین حدود ۴۰ درصد تقاضای آب واحدهای میانی حوضه‌ی رودخانه‌ی هلیل‌رود تأمین نخواهد شد. تقاضای تأمین نشده آب در دو واحد کشاورزی رودبار چپ و راست از همان سال ابتدایی شبیه‌سازی (سال ۲۰۱۱)، روند افزایشی در پیش گرفته است. به‌گونه‌ای‌که در پایان افق شبیه سازی (سال ۲۰۵۰)، تقاضای تأمین نشده آب واحدهای کشاورزی رودبار چپ و راست به ترتیب حدود ۸۳۶ و ۱۱۴ میلیون متر مکعب خواهد شد که معادل بیش از ۹۵ درصد کل تقاضای آب این واحدها در همان سال می‌باشد. این نتیجه نشان می‌دهد که وضعیت تأمین آب مناطق کشاورزی پایین‌دست حوضه در ۳۰ سال آینده تحت شرایط تغییر اقلیم، بسیار نامساعد خواهد بود. در پایان، روند افزایشی میزان تقاضای تأمین نشده آب تحت شرایط تغییر اقلیم طی دوره زمانی مورد بررسی به اثبات رسید.

پس از استخراج داده‌های عملکرد، نیاز خالص آبی محصولات و میزان آب در دسترس مناطق تحت شرایط تغییر اقلیم، مدل دو هدفه ی حداکثرسازی بازده برنامه‌ای و حداقل‌سازی مصرف آب کشاورز برای تأمین نیازهای زیست محیطی تالاب حل و مجموعه‌ی جواب-های کارا برای هر مزرعه نماینده استخراج شد. سپس، با اعمال وزن یکسان به اهداف اقتصادی و زیست محیطی (وزن اهمیت یکسان به اهداف حداکثرسازی بازده برنامه‌ای و حداکثرسازی ذخیره آب یا

حداق‌سازی مصرف آب)، بهترین جواب از مجموعه‌ی جواب‌های کارا برای هر مزرعه نماینده تحت شرایط تغییر اقلیم به‌دست آمد. مقایسه الگوی کشت بهینه بدون تغییر اقلیم با الگوی فعلی مزارع صورت گرفت که نتایج آن در جدول (۵) ارائه شد. سپس به مقایسه‌ی میزان بازده برنامه‌ای کشاورزان و الگوی کشت بهینه متناسب با آن برای مزارع نماینده با و بدون اعمال سناریوی تغییر اقلیم پرداخته شد که نتایج آن در جدول (۶) آمده است.

براساس نتایج جدول (۵)، بازده برنامه‌ای تمامی مزارع نماینده با اعمال الگوی کشت بهینه در مقایسه با الگوی کشت فعلی بین ۸ تا ۴۶ درصد افزایش خواهد یافت. مقایسه الگوی کشت فعلی مزارع نماینده بالادست با الگوی کشت بهینه با تأمین همزمان اهداف حداکثرسازی بازده ناخالص و حداقل‌سازی مصرف آب نشان می‌دهد که می‌توان با کشت بیشتر محصول گوجه‌فرنگی و تا حدودی حفظ سهم محصول گندم به اهداف مورد نظر دست یافت. این مقایسه برای مزارع میانی نشان می‌دهد که کشت محصول سیب‌زمینی در الگوی بهینه در مقایسه با الگوی فعلی افزایش خواهد یافت. در پایان، مقایسه الگوی کشت بهینه و فعلی برای مزارع پایین دست بیانگر این حقیقت است که می‌توان با افزایش کشت محصول گندم و تا حد کمی هندوانه به تأمین همزمان اهداف اقتصادی و زیست محیطی دست یافت.

مطابق با نتایج جدول ۶، در بین مزارع نماینده بالادست، مزرعه‌ی U1 به‌عنوان مزرعه‌ی نماینده‌ی واحد کشاورزی دره هلیل، بیشترین کاهش بازده برنامه‌ای (۳۷ درصد) به ازای هر هکتار سطح فعالیت در اثر تغییر اقلیم را تجربه خواهد کرد. تغییر اقلیم منجر به کاهش شدیدتر بازده برنامه‌ای واحدهای کشاورزی میانی در مقایسه با واحدهای بالادست حوضه خواهد شد. به‌طور مثال، بازده برنامه‌ای در واحد سطح مزرعه‌ی M4 که نماینده‌ی واحد کشاورزی جیرفت ۱ است، در اثر اعمال سناریوی تغییر اقلیم به میزان ۴۷ درصد کاهش خواهد یافت. بازده برنامه‌ای کشاورزان واحدهای پایین‌دست در اثر تغییر اقلیم، بیشترین میزان کاهش در مقایسه با سایر واحدهای کشاورزی حوضه را به دنبال خواهد داشت. همانگونه‌که مشخص است، تغییر اقلیم باعث کاهش ۵۰ درصدی بازده برنامه‌ای در واحد سطح مزرعه‌ی L4 به‌عنوان نماینده‌ی واحد کشاورزی رودبار راست خواهد شد. بنابراین، واحدهای بالادست، آسیب‌پذیری اقتصادی کمتری در مقایسه با واحدهای پایین‌دست حوضه نسبت به پدیده‌ی تغییر اقلیم خواهند داشت. نتایج جدول ۶ نشان می‌دهد که تغییر اقلیم باعث افزایش سهم محصول جو و کاهش سهم محصول گوجه‌فرنگی در مزارع نماینده‌ی بالادست حوضه خواهد شد. برای مزارع نماینده‌ی میانی سطح حوضه، محصول سیب‌زمینی سهم بالایی در الگوی بهینه دارد که تغییر اقلیم باعث کاهش شدید سهم این محصول خواهد شد. همچنین، تغییر اقلیم باعث حذف محصولات خیار و هندوانه در الگوی کشت بهینه مزارع نماینده‌ی رودبار چپ (L1، L2 و L3) و کاهش سهم محصول گندم در الگوی کشت بهینه مزرعه‌ی نماینده‌ی رودبار راست (L4) و جایگزینی محصول جو به جای آن‌ها خواهد شد. پس می‌توان گفت که تغییر اقلیم، الگوی کشت بهینه سطح حوضه را به سمت افزایش سطح زیر کشت محصولات با نیاز آبی پایین و کاهش سطح زیر کشت محصولات آب‌بر تغییر خواهد داد و این تغییرات، کاهش بازده برنامه‌ای کشاورزان در تمامی مناطق حوضه را به دنبال خواهد داشت.

ارزیابی اثرات اتخاذ استراتژی‌های تطبیقی تحت تغییر اقلیم

اثرات اتخاذ استراتژی‌های تطبیقی بر تقاضای تأمین نشده آب واحدهای مختلف حوضه برای سال ۲۰۵۰ نشان داده شده است (جدول ۷). نتایج نشان می‌دهد استراتژی‌های مناسب جهت کاهش تقاضای تأمین نشده آب واحدهای بالا دست (دره هلیل، احیا و جهاد) شامل استراتژی‌های استفاده از سامانه مدرن آبیاری (s2) و کانال‌های مناسب انتقال آب (s1) برای بهبود راندمان آبیاری می‌باشند. همچنین، استراتژی کم آبیاری (s5) نیز اثرات تعدیل‌کننده‌ای بر میزان تقاضای تأمین نشده آب این واحدها بر جای خواهد گذاشت؛ اما، اثر این استراتژی کمتر از دو استراتژی دیگر خواهد بود. درباره‌ی استراتژی های تغییر و اصلاح الگوی کشت (استراتژی‌های s3 و s4) برای واحدهای کشاورزی در بالادست حوضه، نتایج متفاوتی حاصل شده است که به شرایط عرضه‌ی منابع آب و الگوی کشت در آن واحدها بستگی دارد. به گونه‌ای که برای واحد کشاورزی دره هلیل، اتخاذ این استراتژی‌ها، اثرات تغییر اقلیم بر تقاضای تأمین نشده آب را به طور کامل تعدیل؛ اما، نتایج برای واحد کشاورزی جهاد، عکس این مطلب را تأیید می‌کند.

نتایج برای واحدهای میانی حوضه (PC1، PC2 و جیرفت ۱) نشان می‌دهد که استراتژی‌های بهبود راندمان آبیاری (استراتژی‌های s1 و s2) برای واحدهای PC1 و PC2 به دلیل سیستم انتقال و توزیع آب مناسب تحت پوشش شبکه آبیاری و همچنین استفاده مزارع این واحدها از سامانه‌های مدرن آبیاری، اثر قابل توجه‌ای بر کاهش اثرات تغییر اقلیم بر جای نخواهند گذاشت. لذا اصلاح الگوی کشت در جهت افزایش کشت کنجد (s4) برای این واحدها، استراتژی پیشنهادی مناسب خواهد بود. اما، به دلیل سیستم توزیع و انتقال سنتی آب در واحد کشاورزی جیرفت ۱، استراتژی استفاده از کانال‌های مناسب انتقال آب و پوشش انهار (s1) به‌عنوان بهترین استراتژی تطبیقی با شرایط تغییر اقلیم جهت کاهش تقاضای تأمین نشده آب این واحد شناخته می‌شود. همچنین، اعمال کم آبیاری (s5) به دلیل برداشت بی رویه آب در این واحد کشاورزی، اثرات تغییر اقلیم را تعدیل خواهد کرد.

اثرات اتخاذ استراتژی‌های تطبیقی بر تقاضای تأمین نشده آب واحدهای پایین‌دست حوضه نشان می‌دهد که اتخاذ استراتژی اضافه کردن محصول زعفران به الگوی کشت (s3) توسط کشاورزان واحدهای رودبار چپ و راست باعث بیشترین میزان کاهش تقاضای تأمین نشده آب این واحدها خواهد شد. به‌گونه‌ای‌که در پایان سال ۲۰۵۰، تقاضای تأمین نشده آب واحدهای کشاورزی رودبار چپ و راست نسبت به شرایط پایه به ترتیب به میزان حدود ۴۸۹ و ۶۶ میلیون متر مکعب کاهش خواهد یافت. اتخاذ سه استراتژی استفاده از کانال‌های مناسب انتقال آب (s1)، سامانه‌های مدرن آبیاری (s2) و اعمال کم آبیاری (s3) نیز باعث بهبود تأمین تقاضای آب این واحدها خواهند شد.

نتایج الگوی کشت بهینه تحت تغییر اقلیم با و بدون اتخاذ استراتژی‌های تطبیقی برای واحدهای بالادست، میانی و پایین‌دست حوضه در شکل‌های ۴ تا ۶ ارائه شده است. همچنین، بازده برنامه‌ای متناسب با هر الگو محاسبه و نتایج آن در جدول ۸ آمده است. براساس نتایج شکل ۴ و جدول ۸، اتخاذ استراتژی‌های تطبیقی اضافه کردن محصول زعفران به الگو، استفاده از سامانه‌های مدرن آبیاری و کانال‌های مناسب انتقال و توزیع آب باعث افزایش مناسب بازده برنامه‌ای مزارع نماینده‌ی واحدهای کشاورزی بالادست حوضه تحت شرایط تغییر اقلیم خواهد شد. به‌عبارت دیگر، زیان‌های اقتصادی کشاورزان بالادست حوضه در اثر تغییر اقلیم، می‌تواند با اتخاذ این سه استراتژی تطبیقی بهبود یابد. اتخاذ استراتژی تطبیقی اضافه کردن محصول زعفران به الگوی کشت، بازده برنامه‌ای کشاورزان مزارع نماینده دره هلیل، احیا و جهاد را به‌ترتیب به میزان ۴۸، ۳۷ و ۳۴ درصد افزایش خواهد داد که علت آن پر بازده بودن محصول زعفران است.

جدول ۵- مقایسه الگوی کشت بهینه با الگوی فعلی مزارع نماینده واحدهای کشاورزی

Table 5- Comparison of optimal and current crop pattern of representative farms

مزارع نماینده Representative farms	بازده برنامه‌ای (فعلی) Gross margin (current)	بازده برنامه‌ای (بهینه) Gross margin (optimal)	تغییرات Changes	الگوی کشت (درصد) Crop pattern (%)								
	(واحد: میلیون ریال)		(درصد)		W	B	T	C	P	A	Wa	Ci
U1	33.8	40.6	+20	Current	65	12	12	9	0	0	0	0
				Optimal	68	0	30	0	0	0	0	2
U2	37.1	41.4	+12	Current	75	10	15	0	0	0	0	0
				Optimal	62	0	31	0	0	7	0	0
U3	26.5	35.7	+35	Current	85	15	0	0	0	0	0	0
				Optimal	70	0	25	0	0	5	0	0
M1	34.7	40.1	+16	Current	35	25	0	0	40	0	0	0
				Optimal	2	0	33	0	65	0	0	0
M2	24.4	34.6	+42	Current	63	37	0	0	0	0	0	0
				Optimal	70	0	25	0	5	0	0	0
M3	46.7	50.4	+8	Current	0	0	18	44	35	3	0	0
				Optimal	0	0	0	37	57	6	0	0
M4	39.8	52.8	+33	Current	60	18	0	0	10	10	0	2
				Optimal	45	0	0	0	25	25	0	5
M5	30.2	39.5	+31	Current	66	20	14	0	0	0	0	0
				Optimal	82	0	0	0	0	12	0	0
L1	50.3	59.3	+18	Current	10	20	20	40	0	0	10	0
				Optimal	53	0	0	32	0	0	10	0
L2	37.5	54.8	+46	Current	20	20	30	30	0	0	0	0
				Optimal	65	0	0	28	0	0	2	0
L3	47.2	67.7	+43	Current	0	0	70	30	0	0	0	0
				Optimal	47	0	0	38	0	0	15	0
L4	33.1	44.5	+34	Current	45	45	10	0	0	0	0	0
				Optimal	85	0	15	0	0	0	0	0

گندم (Wheat): W جو (Barley): B گوجه فرنگی (Tomato): T خیار (Cucumber): C

سیب زمینی (Potato): P یونجه (Alfalfa): A هندوانه (Watermelon): Wa مرکبات (Citrus): Ci

ماخذ: یافته‌های تحقیق

Source: Research findings

جدول ٦- اثرات تغییر اقلیم بر الگوی کشت بهینه و بازده برنامه‌ای مزارع نماینده واحدهای کشاورزی

Table 6- Effects of climate change (CC) on optimal crop pattern and gross margin of representative farms

مزارع نماینده Representative farms	بازده برنامه‌ای (تغییر اقلیم) Gross margin (climate change) (واحد: میلیون ریال)	بازده برنامه‌ای (بهینه) Gross margin (optimal) (واحد: میلیون ریال)	تغییرات Changes (درصد)		الگوی کشت (درصد) Crop pattern (%) W	B	T	C	P	A	Wa	Ci
U1	25.7	40.6	-37	Optimal	68	0	30	0	0	0	0	2
				CC	26	74	0	0	0	0	0	0
U2	30.3	41.4	-27	Optimal	62	0	31	0	0	7	0	0
				CC	24	52	23.5	0	0	0	0	0.5
U3	32.3	35.7	-10	Optimal	70	0	25	0	0	5	0	0
				CC	72	0	19	0	0	9	0	0
M1	26	40.1	-35	Optimal	2	0	33	0	65	0	0	0
				CC	26	74	0	0	0	0	0	0
M2	19.9	34.6	-42	Optimal	70	0	25	0	5	0	0	0
				CC	0	100	0	0	0	0	0	0
M3	38.3	50.4	-24	Optimal	0	0	0	37	57	6	0	0
				CC	0	26	74	0	0	0	0	0
M4	27.9	52.8	-47	Optimal	45	0	0	0	25	25	0	5
				CC	97	0	3	0	0	0	0	0
M5	28	39.5	-29	Optimal	82	0	0	0	0	12	0	0
				CC	97	0	3	0	0	0	0	0
L1	38.7	59.3	-35	Optimal	53	0	0	32	0	0	10	0
				CC	0	25	75	0	0	0	0	0
L2	38.5	54.8	-30	Optimal	65	0	0	28	0	0	2	0
				CC	65	0	35	0	0	0	0	0
L3	37.2	67.7	-45	Optimal	47	0	0	38	0	0	15	0
				CC	0	26	74	0	0	0	0	0
L4	22.1	44.5	-50	Optimal	85	0	15	0	0	0	0	0
				CC	0	71	28	0	0	0	0	1

C :(Cucumber) خیار T :(Tomato) گوجه فرنگی B :(Barley) جو W :(Wheat) گندم

Ci :(Citrus) مرکبات Wa :(Watermelon) هندوانه A :(Alfalfa) یونجه P :(Potato) سیب زمینی

ماخذ: یافته‌های تحقیق

Source: Research findings

اتخاذ استراتژی‌های تطبیقی افزایش راندمان آبیاری (s1 و s2)، سهم محصولات پر مصرف آب از جمله مرکبات و یونجه در الگوی کشت را به نسبت شرایط پایه تحت تغییر اقلیم افزایش خواهد داد که افزایش چنین محصولاتی، میزان بازده برنامه‌ای زارع را نیز بهبود خواهد بخشید. به طور مثال، اتخاذ استراتژی استفاده از سامانه‌های مدرن آبیاری به‌ترتیب منجر به افزایش ۴۶، ۳۴ و ۱۵ درصدی بازده برنامه‌ای زارعین مزارع نماینده دره هلیل، احیا و جهاد خواهد شد. نتایج شکل ۵ و جدول ۸ برای مزارع میانی نشان می‌دهد که اتخاذ استراتژی اضافه کردن محصول زعفران به الگو، بیشترین اثر مثبت را بر بازده برنامه‌ای کشاورزان خواهد داشت. به‌گونه‌ای‌که اتخاذ استراتژی تطبیقی اضافه کردن محصول زعفران به الگوی کشت به دلیل بازده برنامه‌ای بالای این محصول به‌ترتیب باعث افزایش ۴۱، ۵۷، ۲۴، ۲۲ و ۲۷ درصدی درآمد خالص زارعین مزارع نماینده M1، M2، M3، M4 و M5 خواهد شد. پس از این استراتژی، اتخاذ استراتژی‌های افزایش راندمان آبیاری (s1 و s2) نیز تا حد زیادی بهبود بازده برنامه‌ای مزارع نماینده‌ی واحدهای کشاورزی میانی حوضه را ممکن خواهند ساخت. نتایج برای مزارع M1 و M2 به‌عنوان نماینده‌ی واحد کشاورزی PC1 و مزرعه‌ی M3 به‌عنوان نماینده‌ی واحد کشاورزی PC2 نشان می‌دهد که با اتخاذ استراتژی‌های تطبیقی افزایش راندمان آبیاری، سهم محصولات پرمصرف آب به مانند یونجه، سیب‌زمینی و خیار، افزایش و سهم محصول جو در الگوی کشت بهینه به نسبت شرایط پایه تحت تغییر اقلیم کاهش خواهد یافت. این یافته نشان می‌دهد که با بهبود راندمان آبیاری برای این واحدها می‌توان کشت محصولات پرمصرف آب و به دنبال آن بهبود بازده برنامه‌ای کشاورزان را تحقق بخشید. به‌طور مثال، اتخاذ استراتژی تطبیقی استفاده از سامانه‌های مدرن آبیاری (s2) به‌ترتیب باعث افزایش ۳۱، ۵۱ و ۲۳ درصدی بازده برنامه‌ای مزارع M1، M2 و M3 خواهد شد.

جدول ۷- تقاضای تأمین نشده آب واحدهای کشاورزی بالادست، میانی و پایین‌دست تحت استراتژی‌های تطبیقی مختلف با تغییر اقلیم در سال ۲۰۵۰

Table 4- Water unmet demand of upstream, middle and downstream agricultural units under different adaptive strategies with climate change in 2050 year

واحدهای کشاورزی Agricultural units	P+A2	S1+A2	S2+A2	S3+A2	S4+A2	S5+A2
دره هلیل Dareh-halil	1.320	0.842	0	0	0	1.013
احیا Ehya	2.166	1.135	0.333	1.082	2.821	1.383
جهاد Jahad	0.446	0.212	0.204	2.590	4.572	0.209
PC1 PC1 channel	69.771	43.456	44.058	44.763	22.593	55.944
PC2 PC2 channel	60.469	54.803	58.616	52.348	14.720	58.317
جیرفت ۱ Jiroft1	89.147	19.370	86.852	111.809	289.468	29.934
رودبار چپ Left Roodbar	836.453	611.331	626.935	347.718	904.212	737.070
رودبار راست Right Roodbar	113.859	98.277	98.801	48.057	108.201	92.084

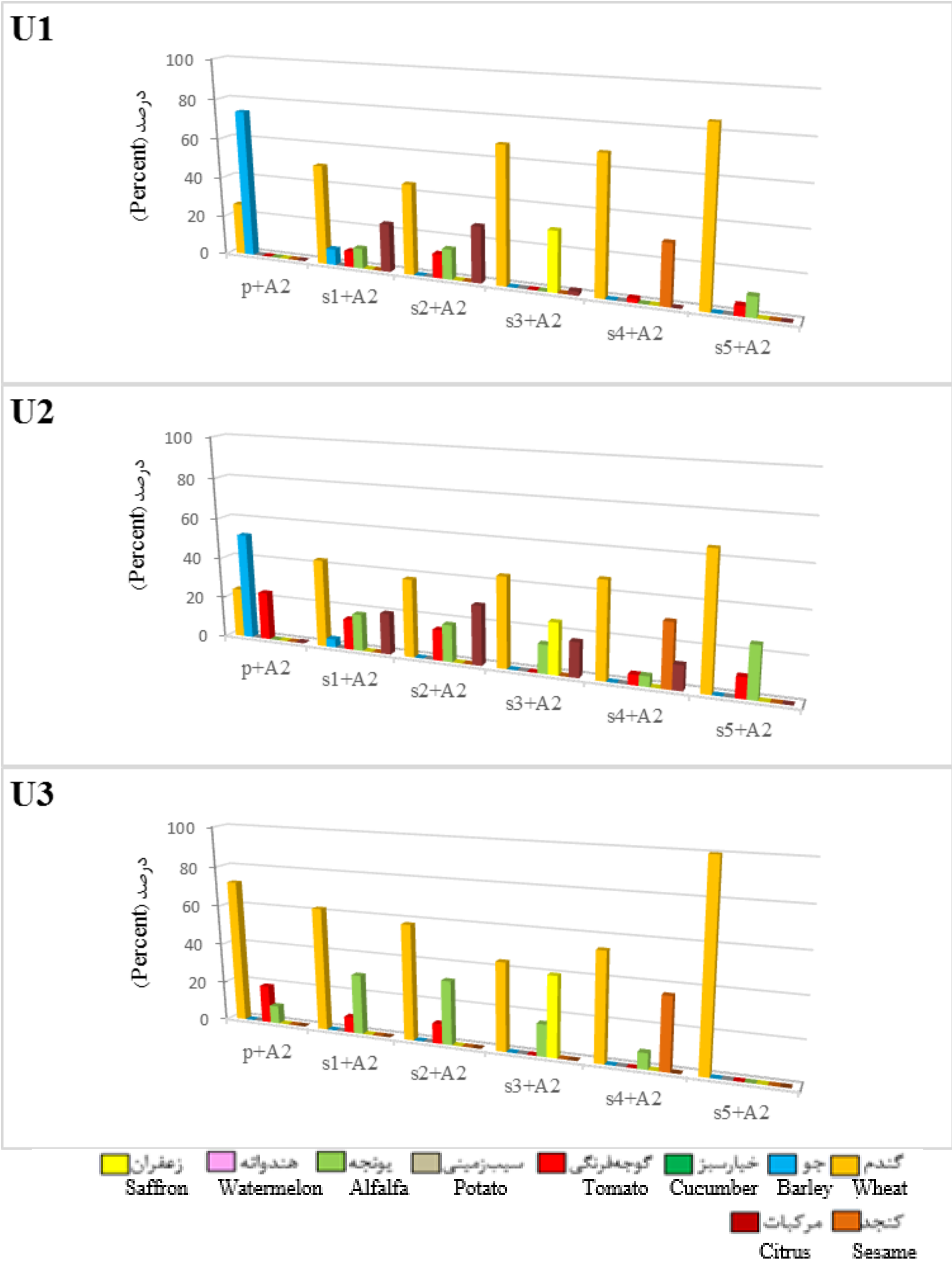
ماخذ: یافته‌های تحقیق

Source: Research findings

نتایج الگوی کشت بهینه مزارع نماینده جیرفت ۱ (مزارع M4 و M5) تحت اتخاذ استراتژی‌های افزایش راندمان آبیاری نشان می‌دهد که سهم محصول گندم کمی کاهش و محصول یونجه جایگزین آن خواهد شد و لذا بهبود بازده برنامه‌ای تحقق خواهد بخشید؛ اما، این میزان افزایش در مقایسه با مزارع نماینده‌ی واحدهای PC1 و PC2 به مراتب کمتر است. نتایج شکل ۶ و جدول ۸ برای مزارع پایین‌دست بیانگر آن است که اتخاذ استراتژی‌های اضافه کردن محصول زعفران به الگو (s3)، استفاده از سامانه‌های مدرن آبیاری (s2) و کانال‌های مناسب انتقال و توزیع آب (s1) باعث افزایش بازده برنامه‌ای کشاورزان این مزارع تحت شرایط تغییر اقلیم خواهند شد. در بین این استراتژی‌ها، استراتژی اضافه کردن محصول زعفران به الگو بیشترین میزان بهبود بازده برنامه‌ای را به خود اختصاص داده است. به گونه‌ای که اتخاذ این استراتژی به ترتیب باعث افزایش ۱۵، ۱۷، ۹ و ۲۰ درصدی بازده برنامه‌ای مزارع L1، L2، L3 و L4 خواهد شد. با اتخاذ استراتژی‌های بهبود راندمان آبیاری (s1 و s2)، سهم محصولات پربازده با مصرف آب بالا به مانند هندوانه، خیار و یونجه برای مزارع L1، L2 و L3 به‌عنوان نماینده‌ی رودبار چپ نسبت به شرایط پایه تحت تغییر اقلیم افزایش خواهد یافت. برای مزرعه‌ی L4 به‌عنوان نماینده‌ی رودبار راست، محصول گندم جایگزین محصول جو در الگوی کشت بهینه خواهد شد. بنابراین، اتخاذ این استراتژی‌ها بهبود بازده برنامه‌ای زارعین واحدهای پایین‌دست حوضه را ممکن خواهد ساخت. به‌طور مثال، با اتخاذ استراتژی استفاده از سامانه‌های مدرن آبیاری (s2)، بازده برنامه‌ای در هر هکتار زارعین مزارع L1، L2، L3 و L4 به‌ترتیب حدود ۱۳، ۷، ۱۱ و ۸ درصد افزایش خواهد یافت. اتخاذ استراتژی تطبیقی افزایش کشت کنجد (s4) و بکارگیری استراتژی اعمال کم آبیاری (s5) نه تنها بازده برنامه‌ای را افزایش معنی‌داری نمی‌دهند بلکه باعث کاهش بازده برنامه‌ای کشاورزان مزارع نماینده‌ی رودبار چپ خواهند شد. کاهش بازده برنامه‌ای در اثر اتخاذ استراتژی افزایش کشت کنجد این مزارع می‌تواند ناشی از جایگزینی کشت این محصول به جای محصول گوجه‌فرنگی و کاهش بازده برنامه‌ای در اثر اتخاذ استراتژی کم آبیاری می‌تواند به دلیل اعمال کم آبیاری همزمان با مصرف کم آب و به دنبال آن کاهش شدید عملکرد محصولات در این مزارع باشد.

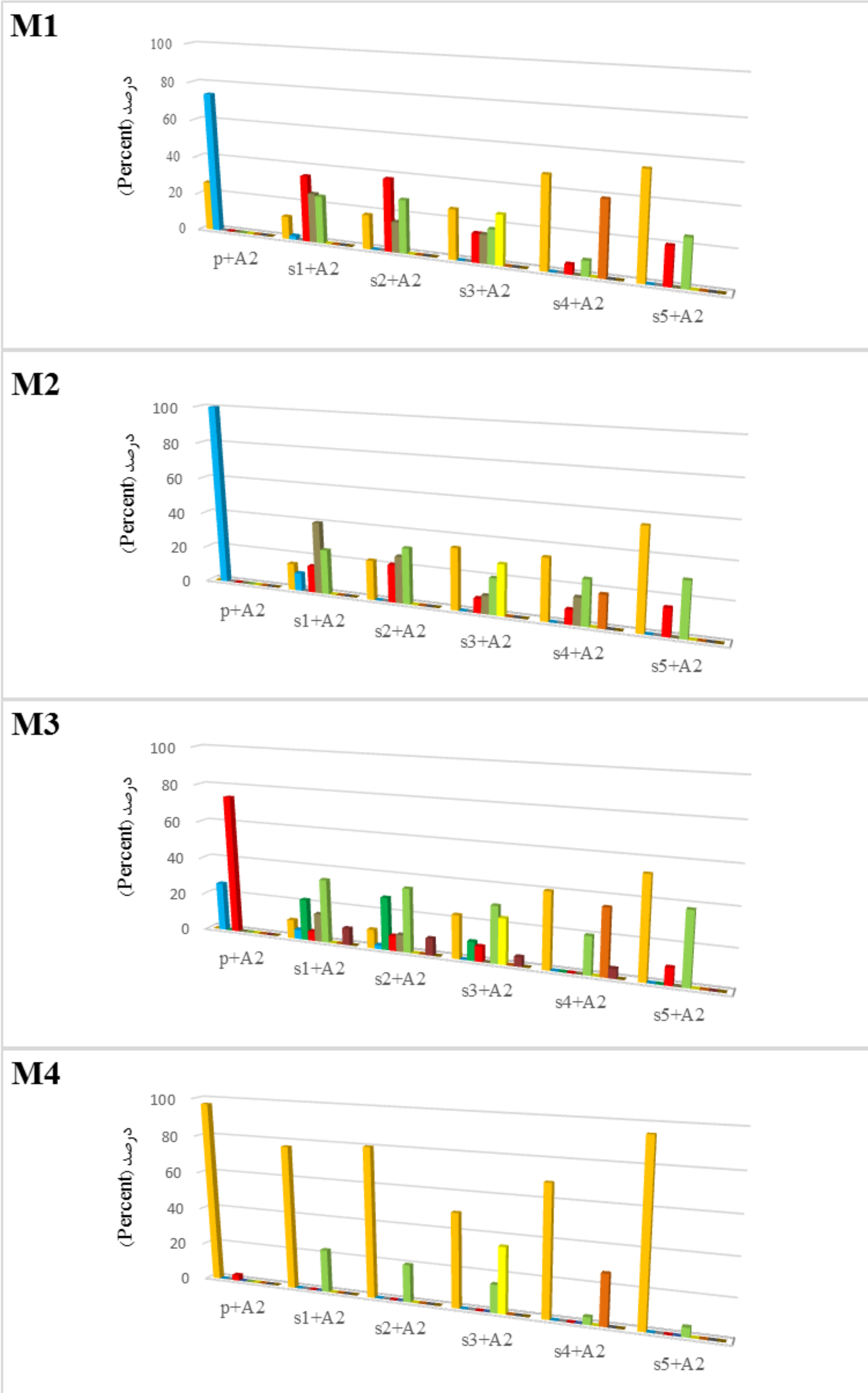
پس به طور کلّی، اعمال استراتژی تطبیقی اضافه کردن محصول زعفران به الگوی کشت برای تمامی واحدهای کشاورزی سطح حوضه، افزایش بازده برنامه‌ای نسبت به شرایط پایه با تغییر اقلیم را به دنبال خواهد داشت. اثر اتخاذ استراتژی‌های تطبیقی استفاده از سامانه‌های مدرن آبیاری و کانال‌های مناسب انتقال و توزیع آب بر بازده برنامه‌ای کشاورزان به خصوص کشاورزان مزارع بالادست حوضه، افزایشی خواهد بود که این یافته بیانگر برداشت آب و

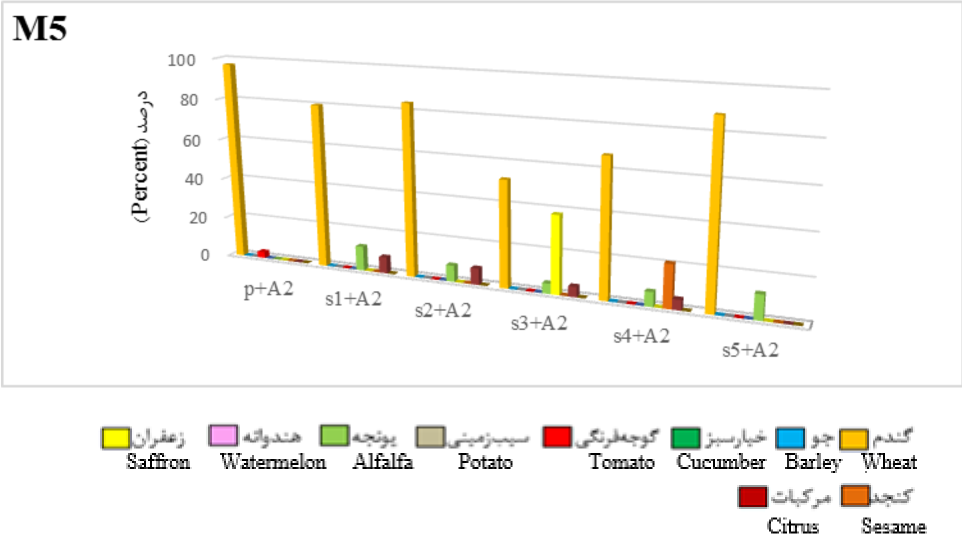
تکنولوژی آبیاری سنتی این مزارع می‌باشد. استراتژی تطبیقی کم آبیاری نیز در برخی مزارع کاهش و در برخی دیگر افزایش بازده برنامه‌ای کشاورزان در تمامی واحدها در مقایسه با شرایط پایه را به دنبال خواهد داشت که این اثر برای مزارع پایین‌دست حوضه به دلیل آب مصرفی کمتر کاهشی خواهد بود. از طرف دیگر، با اتخاذ استراتژی‌های تطبیقی مختلف، بهبود بازده برنامه‌ای واحدهای پایین دست در مقایسه با سایر واحدها چندان قابل توجه نخواهد بود. بنابراین، پتانسیل مزارع بالادست و میانی حوضه برای بهبود بازده برنامه‌ای از طریق اتخاذ استراتژی‌های تطبیقی بیش از مزارع پایین دست حوضه می‌باشد.



شکل ٤- الگوی کشت بهینه مزارع نماینده بالادست تحت شرایط تغییر اقلیم با و بدون استراتژی‌های تطبیقی

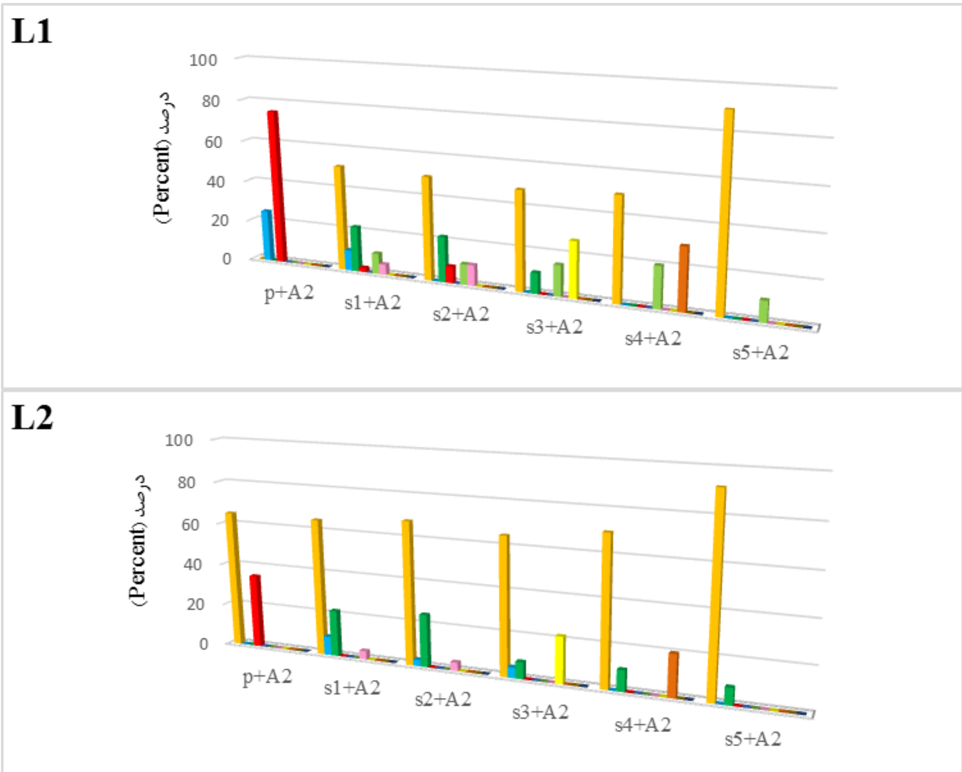
Figure 4- Optimal crop pattern of upstream representative farms under climate change with/without adaptive strategies

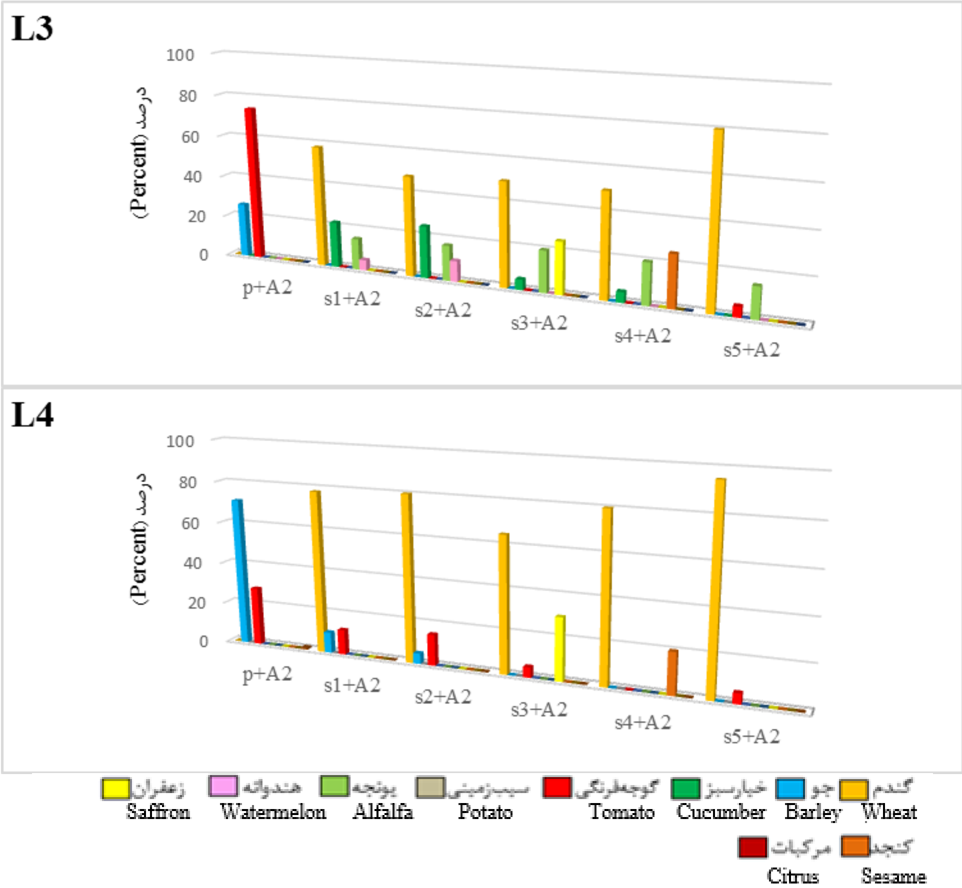

M1
100
80
60
40
20
0
(Percent) درصد
p+A2
s1+A2
s2+A2
s3+A2
s4+A2
s5+A2
M2
100
80
60
40
20
0
(Percent) درصد
p+A2
s1+A2
s2+A2
s3+A2
s4+A2
s5+A2
M3
100
80
60
40
20
0
(Percent) درصد
p+A2
s1+A2
s2+A2
s3+A2
s4+A2
s5+A2
M4
100
80
60
40
20
0
(Percent) درصد
p+A2
s1+A2
s2+A2
s3+A2
s4+A2
s5+A2



شکل ۵- الگوی کشت بهینه مزارع نماینده میانی تحت شرایط تغییر اقلیم با و بدون استراتژی‌های تطبیقی

Figure 5- Optimal crop pattern of middle representative farms under climate change with/without adaptive strategies





شکل ٦- الگوی کشت بهینه مزارع نماینده پایین‌دست تحت شرایط تغییر اقلیم با و بدون استراتژی‌های تطبیقی

Figure 6- Optimal crop pattern of downstream representative farms under climate change with/without adaptive strategies

جدول ۸- اثر اتخاذ استراتژی‌های تطبیقی کشاورزان بر بازده برنامه‌ای (میلیون ریال در هر هکتار)

Table 8- Effects of adopting adaptive strategies on gross margin (Milion rial per hectar)

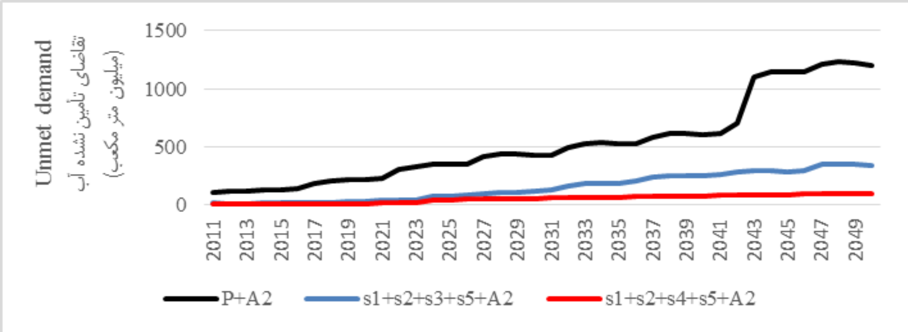
مزارع نماینده Farm representative	p+A2	s1+A2	s2+A2	s3+A2	s4+A2	s5+A2
U1	25.7	34.7(+35%)	37.5(+46%)	38(+48%)	30.1(+17%)	29.3(+14%)
U2	30.3	38.5(+27%)	40.6(+34%)	41.5(+37%)	33.6(+11%)	34.2(+13%)
U3	32.3	36.5(+13%)	37.1(+15%)	43.3(+34%)	32.9(+2%)	28.7(-11%)
M1	26	33.3(+28%)	34.1(+31%)	36.7(+41%)	31.7(+22%)	34.6(+33%)
M2	19.9	28.7(+44%)	30.1(+51%)	31.3(+57%)	27.3(+37%)	28.3(+42%)
M3	38.3	46.7(+22%)	47.1(+23%)	47.5(+24%)	40.2(+5%)	38.7(+1%)
M4	27.9	31.2(+12%)	30.7(+10%)	34.0(+22%)	27.1(-3%)	28.0(0)
M5	28	31.6(+13%)	31.1(+11%)	35.6(+27%)	29.1(+4%)	28.6(+2%)
L1	38.7	41.0(+6%)	43.7(+13)	44.5(+15%)	37.9(-2%)	37.5(-3%)
L2	38.5	40.4(+5%)	41.2(+7%)	45.1(+17%)	35.1(-9%)	36.2(-6%)
L3	37.2	38.3(+3%)	41.3(+11%)	40.5(+9%)	36.5(-2%)	35.7(-4%)
L4	22.1	22.8(+3%)	23.9(+8%)	26.5(+20%)	22.8(+3%)	22.6(+2%)

ماخذ: یافته‌های تحقیق

Source: Research findings

در ادامه، به بررسی اثرات اتخاذ ترکیبی از استراتژی‌های تطبیقـی پرداخته شد. برای این منظور دو استراتژی ترکیبی در نظر گرفته شده

است کـه شـامل اسـتراتژی‌هـای تطبیقـی s1+s2+s3+s5 (ترکیـب استراتژی‌های استفاده از کانال‌های مناسب آبیاری، استفاده از سـامانه های مدرن آبیاری، اضافه کردن محصول زعفران به الگو و اعمال کم آبیاری) و s1+s2+s4+s5 (ترکیب اسـتراتژی‌هـای اسـتفاده از کانـال های مناسب آبیاری، استفاده از سـامانه‌هـای مـدرن آبیـاری، افـزایش کشت محصول کنجد و اعمال کم آبیاری) می‌باشند. در ابتدا، اثر ایـن استراتژی‌ها تحت شرایط تغییر اقلیم بر تقاضای تأمین نشـده آب کـل حوضه بررسی و نتایج آن ارائه شده است (شکل ۷).



شکل ۷- تقاضای تأمین نشده آب در سطح حوضه تحت اتخاذ استراتژی‌های تطبیقی ترکیبی با تغییر اقلیم

Figure 7- Water unmet demand of basin under adopting combined adaptive strategies with climate change

نتایج نشان می‌دهد که با اتخاذ ترکیبی از استراتژی‌های تطبیقی، میزان تقاضای تأمین نشده‌ی آب در سطح کل حوضه تحت شـرایط تغییر اقلیم به شدت کـاهش خواهـد یافـت کـه از ایـن دو اسـتراتژی ترکیبی، اتخـاذ اسـتراتژی s1+s2+s4+s5 (ترکیـب اسـتراتژی‌هـای استفاده از کانال‌های مناسب آبیـاری، اسـتفاده از سـامانه‌هـای مـدرن آبیاری، افزایش کشت محصول کنجد و اعمال کـم آبیـاری)، کـاهش بیشتر تقاضای تأمین نشده آب در سطح حوضه تحـت شـرایط تغییـر اقلیم را ممکن خواهد ساخت. با توجه به نتایج بدست آمده، تقاضـای تأمین نشده آب در پایان افق شـبیه‌سـازی بـا اتخـاذ ایـن اسـتراتژی ترکیبی از ۱۲۰۰ میلیون متر مکعب به حدود ۱۰۰ میلیون متر مکعـب خواهد رسید. از طرف دیگر، مقایسه اتخاذ استراتژی‌های تطبیقـی بـه صورت جداگانه نشان داد کـه اتخـاذ اسـتراتژی کشـت زعفـران (s3) بیشترین کاهش تقاضای تأمین نشده آب به میزان ۶۰۰ میلیـون متـر مکعب را به دنبال خواهد داشت. پس می‌توان گفت که اتخاذ چنـدین استراتژی تطبیقی در سـطح حوضـه توسـط کشـاورزان باعـث بهبـود عملکرد هیدرولوژیکی سطح حوضه خواهد شد.

در ادامه، اثر اتخاذ ترکیبی از استراتژی‌های تطبیقی بـر میـانگین بازده برنامه‌ای کشاورزان مزارع نماینده‌ی سـطح حوضـه بـرآورد و بـا شرایط پایه تحت تغییر اقلیم مقایسه و نتایج آن در جدول ۹ ارائه شده اسـت. نتـایج نشـان مـی‌دهـد کـه اتخـاذ اسـتراتژی ترکیبـی s1+s2+s3+s5، میانگین بازده برنامه‌ای زارعین مزارع نماینـده را ۶۸ درصد افزایش خواهد داد. در صورتی که نتایج اثر اتخاذ استراتژی‌های تطبیقی به‌صـورت جداگانـه نشـان داد کـه اتخـاذ هـیچ یـک از ایـن استراتژی‌ها نمی‌تواند بازده برنامه‌ای زارعین را به این میـزان افـزایش دهد. بنابراین، نتیجه گرفته می‌شود که اتخاذ ترکیبی از استراتژی‌های تطبیقی مورد بررسی، اثرات تغییر اقلیم بر سطح حوضه را تا حد بسیار زیادی تعدیل و باعث افزایش عملکرد اقتصادی سطح حوضـه خواهـد شد.

جدول ۹- اثر اتخاذ استراتژی‌های ترکیبی بر میانگین بازده برنامه‌ای مزارع نماینده در سطح حوضه (میلیون ریال در هر هکتار)

Table 9- Effetc of adopting combined adaptive strategies on gross margin average of representative farms in basin

Adaptive strategies (استراتژی‌های تطبیقی)	s1+s2+s4+s5+A2	s1+s2+s3+s5+A2
Gross margin changes (تغییرات بازده برنامه‌ای)	+44%	+68%

ماخذ: یافته‌های تحقیق

Source: Research findings

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در مطالعه‌ی حاضر، مدل‌سازی یکپارچه اقتصادی-هیـدرولوژیکی جهت تحلیـل اثـرات تغییـر اقلـیم و اتخـاذ اسـتراتژی‌هـای تطبیقـی کشاورزان در حوضه‌ی آبریز رودخانه‌ی هلیل‌رود صورت گرفته اسـت. برای این منظور مدل دو هدفه اقتصادی-زیست محیطی بـا اهـداف حداکثرسازی بازده برنامه‌ای و حداقل سازی مصرف آب جهت تـأمین حـق آب تـالاب جازموریـان از طریـق روش برنامـه‌ریـزی خطـی - εconstraint تعمیم‌یافته حل و بهترین پاسخ و الگـو بـا وزن اهمیـت

یکسان اهداف برای تمامی مزارع نماینده سطح حوضه استخراج شده است. سپس الگوهای بهینه استخراجی در نرم‌افزار WEAP وارد گشته و شبیه‌سازی هیدرولوژیکی با و بدون سناریوی تغییر اقلیم بدبینانه‌ی A2 صورت گرفته است. نتایج نشان داد که تغییر اقلیم تا افق ۲۰۵۰ باعث کاهش عملکرد و افزایش نیاز آبی محصولات و در نتیجه کاهش بازده برنامه‌ای کشاورزان در سطح حوضه خواهد شد. استیو و همکاران (۱۰) نیز نتایج مشابهی از کاهش عملکرد محصولات و افزایش نیاز آبی تحت تغییر اقلیم در سایر نقاط جهان را استخراج کرده‌اند. بررسی عملکرد هیدرولوژیکی سطح حوضه در اثر تغییر اقلیم نشان داد که تغییر اقلیم اثر منفی بر عرضه، تقاضای تأمین نشده و قابلیت اطمینان تأمین تقاضای آب در آینده خواهد داشت و این اثر منفی برای واحدهای کشاورزی پایین‌دست حوضه شدیدتر خواهد بود. بنابراین، واحدهای کشاورزی پایین‌دست تحت شرایط تغییر اقلیم با چالش کمبود منابع آبی بیشتری در آینده مواجه خواهند بود.

برای تعدیل اثرات تغییر اقلیم در آینده و مدیریت منابع آب تحت این شرایط، استراتژی‌های تطبیقی مختلفی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این مطالعه، پنج استراتژی تطبیقی استفاده از کانال‌های مناسب انتقال و توزیع آب و پوشش انهار (s1)، استفاده از سامانه‌های مدرن آبیاری (s2)، اضافه کردن محصول زعفران به‌عنوان یک محصول پر بازده با نیاز آبی مناسب (s3)، افزایش کشت کنجد در جهت کاهش مصرف آب (s4) و اعمال کم آبیاری به میزان ۲۰ درصد برای محصولات گندم، گوجه فرنگی و یونجه (s5) مورد ارزیابی قرار گرفته است. مقایسه‌ی نتایج ارزیابی اثرات اتخاذ استراتژی‌های تطبیقی با تغییر اقلیم بر عملکرد هیدرولوژیکی در واحدهای مختلف سطح حوضه‌ی رودخانه‌ی هلیل‌رود نشان داد که استراتژی‌های استفاده از سامانه‌های مدرن، کانال‌های مناسب انتقال آب و پوشش انهار و به دنبال آن بهبود راندمان آبیاری می‌تواند به منظور مدیریت تقاضای آب و بهبود عملکرد هیدرولوژیکی واحدهای بالادست حوضه موثر باشد. به این دلیل که سیستم انتقال و توزیع آب در این واحدها سنتی بوده است و آبیاری به‌صورت سطحی در بیشتر مزارع این واحدها به دلیل دسترسی به منابع آبی فراوان انجام می‌شود. برای واحدهای میانی که تحت پوشش شبکه آبیاری جیرفت قرار دارند (واحدهای PC1 و PC2)، استراتژی اصلاح الگوی کشت در جهت افزایش کشت محصول کنجد، بهترین استراتژی در جهت بهبود عملکرد هیدرولوژیکی شناخته می‌شود و برای واحدی که انتقال و توزیع آب در آن، سنتی (واحد جیرفت ۱) انجام می‌شود، استراتژی‌های لازم جهت بهبود راندمان آبیاری موثر می‌باشند. در پایان، استراتژی های موثر در مدیریت تقاضای منابع آب و افزایش عملکرد هیدرولوژیکی واحدهای پایین‌دست حوضه شامل استراتژی اضافه کردن محصول زعفران به الگوی کشت و استراتژی‌های لازم در جهت بهبود راندمان آبیاری می‌باشند.

مقایسه اثرات اتخاذ استراتژی‌های تطبیقی مختلف بر عملکرد اقتصادی سطح حوضه نشان داد که برای واحدهای بالادست، استراتژی‌های استفاده از سامانه‌های مدرن آبیاری، استفاده از کانال-های مناسب انتقال آب و اضافه کردن محصول زعفران به الگوی کشت علاوه بر افزایش عملکرد هیدرولوژیکی منجر به بهبود عملکرد اقتصادی نیز خواهند شد. بنابراین، راهکارهای بهبود راندمان آبیاری در واحدهای کشاورزی بالادست حوضه پیشنهاد می‌شود. برای این منظور، پوشش انهار، استفاده از سیستم توزیع آب مناسب در سطح مزرعه و تغییر تکنولوژی آبیاری سطحی به سامانه‌های مدرن آبیاری توصیه می‌شود. برای واحدهای میانی، استراتژی‌های لازم جهت بهبود راندمان آبیاری تا حدی عملکرد اقتصادی را بهبود خواهند داد. اما بهترین استراتژی در جهت افزایش عملکرد اقتصادی برای این واحدها، استراتژی اضافه کردن محصول زعفران به الگو خواهد بود که البته این استراتژی در بهبود عملکرد هیدرولوژیکی موفق نخواهد بود. بر خلاف این استراتژی، استراتژی افزایش کشت محصول کنجد به الگو، بهبود عملکرد هیدرولوژیکی را به دنبال خواهد داشت؛ اما، افزایش عملکرد اقتصادی را نتیجه نخواهد داد. پس بسته به وزن هدف مورد نظر، می‌توان استراتژی مناسبی را برای این واحدها پیشنهاد کرد. برای واحدهای پایین‌دست حوضه بهترین استراتژی، اضافه کردن محصول زعفران به الگوی کشت خواهد بود چرا که علاوه بر بهبود عملکرد هیدرولوژیکی، وضعیت اقتصادی را در حد زیادی ارتقاء خواهد داد. لازم به ذکر است که در این واحدها، استراتژی افزایش کشت کنجد یک استراتژی ناکارآمد جهت بهبود عملکردهای هیدورولوژیکی و اقتصادی است. بنابراین، استراتژی اضافه کردن محصول زعفران به الگو به جای محصولات هندوانه، خیار سبز و گوجه فرنگی که در این منطقه به وفور کشت می‌شوند، پیشنهاد می‌شود، چرا که هم بهبود شرایط اقتصادی و هم کاهش مصرف منابع آب را به دنبال خواهد داشت. نتایج متفاوت برای واحدهای مختلف، ماهیت پویایی و چند سطحی بودن آسیب‌پذیری و تطبیق را نشان می‌دهد که در سایر مطالعات نیز به اثبات رسیده است (۲۹ و ۳۹). لذا پیشنهاد می‌شود که مطالعات برای هر حوضه و هر منطقه به‌صورت خاص مورد بررسی قرار گیرد، چرا که نمی‌توان یک الگوی مشخص و یا یک استراتژی مشخص به منظور مدیریت منابع آب هر حوضه، منطقه و یا هر واحد کشاورزی به کار گرفت. همچنین بر خلاف باور عموم، اتخاذ برخی از این استراتژی‌ها در برخی واحدها، می‌تواند ضمن بهبود عملکرد هیدرولوژیکی، بازده برنامه‌ای کشاورزان را نیز افزایش دهد که تأثیر مثبت استراتژی‌های تطبیقی بر بهبود سطح درآمد کشاورزان در مطالعات دیگری نیز به اثبات رسیده است (۱۰ و ۳۵). در پایان، اثر اتخاذ ترکیبی از استراتژی‌های تطبیقی مورد بررسی تحت شرایط تغییر اقلیم مورد آزمون قرار گرفت. نتایج نشان

داد که ترکیب استراتژی‌های تطبیقی مختلف در مقایسه با اتخاذ یـک اسـتراتژی تطبیقـی مشـخص در بهبـود عملکـرد هیـدرولوژیکی و اقتصادی سطح حوضه کارآمدتر خواهد بود. بنـابراین، لـزوم راهنمـایی کشاورزان به بکارگیری چند استراتژی تطبیقـی بـه صـورت همزمـان توصیه می‌شود.

منابع

1- Agriculture-Jahad organization in south of Kerman province. 2017. (In Persian)
2- Barkhori S., Mahdavi R., Zehtabian Gh., and Gholami, H. 2018. Evaluation of the climatic variables of Jiroft Plain using HadCM3 model in future periods. Journal of Range and Watershed Management 71(2): 355-366.
3- Bartolini F., Bazzani G.M., Gallerani V., Raggi M. and Viaggi D. 2007. The impact of water and agriculture policy scenarios on irrigated farming systems in Italy: An analysis based on farm level multi-attribute linear programming models. Agricultural System 93: 90-114.
4- Blanco-Gutierrez I., Varela-Ortega C., and Purkey D.R. 2013. Integrated assessment of policy interventions for promoting sustainable irrigation in semi-arid environments: A hydro-economic modeling approach. Journal of Environmental Management, 128:144-160.
5- Brown C.M., Lund J.R., Cai X., Reed P.M., Zagona E.A., Ostfeld A., Hall J., Characklis G.W., Yu W., and Brekke L. 2015. The future of water resources systems analysis: toward a scientific framework for sustainable water management: the future OF water resources systems analysis. Water Resource Research 51(8): 6110–6124.
6- D'Agostino D.R., Scardigno A., Lamaddalena N., and ElChami D. 2014. Sensitivity analysis of coupled hydro-economic models: quantifying climate change uncertainty for decision-making. Water Resource Management 28(12): 4303-4318.
7- Downing T. E. 2012. Views of the frontiers in climate change adaptation economics. WIREs Climate Change 3: 161-170.
8- Draper, D. 2011. Assessment and Propagation of Model Uncertainty. E Scholarship.
9- Eliasson J. 2015. The rising pressure of global water shortages. Nature, 517(7532):6.
10- Esteve P., Varela-Ortega C., Gutierrez I., and Downing T.E. 2015. A hydro-economic model for the assessment of climate change impacts and adaptation in irrigated agriculture. Ecological Economics 120: 49-58.
11- Forni L.G., Medellin-Azuara J., Tansey M., Young Ch., Purkey D., and Howitt R. 2016. Integrating complex economic and hydrologic planning models: An application for drought under climate change analysis. Water Resources and Economics16: 15-27.
12- Gohar A.A., Ward F.A., and Amer S.A. 2013. Economic performance of water storage capacity expansion for food security. Journal of Hydrology 484: 16-25.
13- Gohar, A.A., Amer S.A., and Ward F.A. 2015. Irrigation infrastructure and water appropriation rules for food security. Journal of Hydrology 520: 85-100.
14- Gottschalk P., Luttger A., Huang Sh., Leppelt Th., and Wechsung, F. 2018. Evaluation of crop yield simulations of an eco-hydrological model at different scales for Germany. Field Crops Research 228: 48-59.
15- Harou J.J., Pulido-Velazquez M., Rosenberg D.E., Medellin-Azuara J., Lund J.R., and Howitt R.E. 2009. Hydro-economic models: Concepts, design, applications and future prospects. Journal of Hydrology 375(3-4): 627-643.
16- Hwang C., and Masud A. 1979. Multiple objective decision making, methods and applications: A state of the art survey. Economic and Mathematical System 164: 18-27.
17- Joyce B.A., Mehta V.K., Purkey D.R., Dale L.L., and Hanemann M. 2011. Modifying agricultural water management to adapt to climate change in California's central valley. Climate Change, 109 (Suppl. 1):S299-S316.
18- Kahil M.T., Dinar A., and Albiac J. 2015. Modelling water scarcity and droughts for policy adaptation to climate change in arid and semiarid regions. Journal of Hydrology 522: 95-109.
19- Kahil M.T., Ward F., Albiac J., Eggleston J., and Sanz D. 2016. Hydro-economic modeling with aquifer–river interactions to guide sustainable basin management. Journal of Hydrology 539: 510-524.
20- Li M., Fu Q., Singh V.P., Ma M., and Liu X. 2017. An intuitionistic fuzzy multi-objective non-linear programming model for sustainable irrigation water allocation under the combination of dry and wet conditions. Journal of Hydrology 555: 80-94.
21- Lu H.W., Li J., Ren L.X., and Chen Y.Z. 2018. Optimal groundwater security management policies by control of inexact health risks under dual uncertainty in slope factors. Chemosphere 198: 161-173.
22- Medellín-Azuara J., Howitt R.E., MacEwan D.J., and Lund J.R. 2010. Economic impacts of climate-related changes to California agriculture. Climate Change 109: 387-S405.
23- Mirzaei A., and Zibaei M. 2020. Water conflict management between agriculture and wetland under climate change: Application of Economic-Hydrological-Behavioral Modelling. Water Resources Management 1-21.
24- Moriondo M., Bindi M., Zbigniew W., Kundzewicz Szwed M., Chorynski A., Matczak P., Radziejewski M., McEvoy D., and Wreford A. 2010. Impact and adaptation opportunities for European agriculture in response to

climatic change and variability. Mitigation Adaptation Strategies Global Change 15(7): 657-679.
25- Nikouei A. 2012. Integrated economic-hydrological modeling of water allocation and use in Zayandehrood river basin with emphasis on evaluation of environmental and drought policies. Ph.D. thesis, Shiraz University. (In Persian)
26- Nikouei A., Zibaei M., and Ward F.A. 2012. Incentives to adopt irrigation water saving measures for wetlands preservation: An integrated basin scale analysis. Journal of Hydrology 464-465:216-232.
27- Pourseyadi A., and Kashkuli H.A. 2012. Studying of groundwater conditions in Jiroft basin with MODFLOW. Irrigation Sciences and Engineering 35(2): 51-63. (In Persian)
28- Regional water company of Kerman province. 2017. Water resources basic studies office. (In Persian)
29- Reidsma P., Ewert F., Lansink A.O., and Leemans R. 2010. Adaptation to climate change and climate variability in European agriculture: the importance of farm level responses. The European Journal of Agronomy 32: 91-102.
30- Rochdane S., Reichert B., Messouli M., Babqiqi A., and Khebiza M.Y. 2012. Climate change impacts on water supply and demand in Rheraya Watershed (Morocco), with potential adaptation strategies. Water, 4:28-44.
31- Salman D., Amer, S.A., and Ward F. 2017. Protecting food security when facing uncertain climate: Opportunities for Afghan communities. Journal of Hydrology 554: 200-215.
32- Shooshtarian A. 2010. Agri-environmental, economic and biophysical policy analysis in Mashhad-bilo watershed: towards agricultural sustainability. Ph.D. thesis, Shiraz University. (In Persian)
33- Sieber J., and Purkey D. 2011. WEAP, water evaluation and planning system. User Guide. Stockholm Environment Institute, U.S. Center, Somerville, USA.
34- Sunde M.G., He H.S., Hubbart J.A., and Urban M.A. 2018. An integrated modeling approach for estimating hydrologic responses to future urbanization and climate changes in a mixed-use Midwestern. Journal of Environmental Management 220: 149-162.
35- Tanaka S.K., Zhu T., Lund J.R., Howitt R.E., Jenkins M.W., Pulido M.A., Tauber M., Ritzema R.S., and Ferreira I.C. 2006. Climate warming and water management adaptation for California. Climate Change 76: 361-387.
36- Tarazkar M.H. 2015. Integrated of water resource management in Doroodzan dam basin. Ph.D. thesis, Shiraz University. (In Persian)
37- Ventrella D., Charfeddine M., Moriondo M., Rinaldi M., and Bindi M. 2012. Agronomic adaptation strategies under climate change for winter durum wheat and tomato in southern Italy: irrigation and nitrogen fertilization. Regional Environmental Change 12: 407-419.
38- Ward F.A. 2014. Economic impacts on irrigated agriculture of water conservation programs in drought. Journal of Hydrology 508: 114-127.
39- Westerhoff L., and Smit B. 2008. The rains are disappointing us: dynamic vulnerability and adaptation to multiple stressors in the Afram Plains, Ghana. Mitigation Adaptation Strategies Global Change 14: 317-337.
40- Wilhite D.A. 2005. Drought and Water Crises Science, Technology and Management Issues. CRC Press, Taylor & Francis Group, USA.
41- Yates D., Sieber J., Purkey D., and Huber-Lee A. 2005. WEAP21 - a demand-, priority-, and preference-driven water planning model. Part 1: model characteristics. Water International 30(4): 487-500.
42- Zhang F., Zhang Ch., Yan Z., Guo Sh., Wang Y., and Guo P. 2018. An interval nonlinear multi objective programming model with fuzzy interval credibility constraint for crop monthly water allocation. Agricultural Water Management 209: 123-133.
43- Zibaei M. 2007. Investigating determinants of sprinkler irrigation technology discontinuance in Iran: Comparison of logistic regression and discriminant analysis. Agricultural Economics and Development 1(2): 0-0. (In Persian)

Journal of Agricultural Economics and Development
Vol. 34, No. 4, Winter 2021, p. 397-419

نشریه اقتصاد و توسعه کشاورزی
جلد ۳۴، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۹، ص. ۴۱۹-۳۹۷

Investigation of Adaptation Strategies for Agricultural Water Resources Management under Climate Change in Halil-rud River Basin

A. Mirzaei[1*]- M. Zibaei[2]
Received: 20-07-2020
Accepted: 26-08-2020

Introduction: During the last decades, climate change has been highly disjointed. Recent studies on climate change has approached the assessment of impacts of this phenomenon and adaptation strategies under biophysical or social perspectives. In the field of agriculture and water resources, most assessments have been based on biophysical modelling focusing on the agronomic dimension or the hydrological dimension. Therefore, integrate biophysical and social aspects looking at environmental and human contexts are vital for investigation of climate change and adaptation strategies effects. In line with this, varied types of integrated modelling frameworks have been developed to address the different scales (from the crop to the river basin) and the different dimensions of climate change, water and agriculture (hydrological, agronomic, socio economic). Water resources in the Halil-Rud river basin are likely to be seriously affected by climate change in the form of increased water scarcity and more frequent droughts which leads to conflicts among different water users and uses, especially between agricultural sector and Jazmourian wetland services. However, because of the multidimensional and multi-scalar nature of water management and climate change, it is needed to integrate tools for the analysis of impacts and adaptation. In line with this, current study presents an economic – hydrological model to evaluate potential effects of climate change and adaptation strategies on irrigated agriculture and to solve or mitigate water resources conflicts among different water users and uses in studied basin.

Materials and Methods: This study, combines a farm-based economic multi-objectives optimization model with the hydrologic model water evaluation and planning (WEAP) which can represent the socio-economic, agronomic and hydrologic systems in a spatially-explicit manner covering all dimensions and scales relevant to climate change. To this end, current study was organized in two sections. In the first section, the effects of a climate change under A2 scenario and balanced groundwater withdrawal (sustainable groundwater use) on hydrological and economic performance of basin level were investigated using an economic, agronomic and hydrologic model. Finally, adopting suitable adaptive strategies on hydrological and economic conditions were evaluated using that model. A2 scenario is primarily simulated through the hydrologic model, as it represents physical characteristics of the crop and water systems, through changes in climate variables. On the other hand, adaptation strategies that affect human behavior are firstly simulated by the economic multi-objectives model. The hydro-economic simulation model is started with the multi-objectives model run which include economic and hydrological objectives. Then, Using the MABIA method and WEAP irrigation water requirements would be calculated, allocating water to crops depending on water availability and established priorities, and estimating crop yields would be done. After the first economic-hydrologic model simulation, there is a second economic-hydrologic iteration. The economic model uses WEAP results on water delivered to irrigation communities (water availability constraints at farm level), crop yields (used to calculate the gross margin per crop) and irrigation water requirements under the simulated climate scenario and adaptation strategies to simulate farmers' adjustment of cropping patterns to a new optimal land allocation.

Result and Discussion: results indicates the multi-dimensional effects of climate change and adaptation strategies and show the large potential of integrated hydro-economic models for representing the multi-scale processes related to climate change and water management. The analysis of decisions taken at farm level has been proven to be necessary, as crop model results capture the potential of farm level adaptation to mitigate the damaging effects of climate change and these are relevant to climate change adaptation as highlighted by Reidsma et al. (2010). Results for the climate change under A2 scenario and balanced groundwater withdrawal scenario (combined scenario) on status of hydrological and economic in the level basin showed that crops yield, areas with available water and water demand reliability would decrease, while crops net water demand and areas water unmet demand would increase and farmers' income would decrease between 10 to 37 percent for upstream, between 24 to 47 percent for middle and between 30 to 50 percent for downstream units in long –term horizon in comparison to base scenario. But, adopting suitable adaptive strategies and measures could mitigate

---

1 and 2- Ph.D. and Professor in Agricultural Economics, Shiraz University, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: mabbas1369@gmail.com)
DOI: 10.22067/jead.2021.17801.0

the effects of climate change on hydrological conditions specially for downstream areas and economic conditions including upstream areas. Finally, combined suitable water transmission system, modern irrigation technologies, saffron crop cultivation and deficit irrigation of some crops adaptive strategies simultaneously indicated that unmet water demand significantly decreases and the total gross margin of agricultural sector increases by 68% in comparison to base scenario under climate change.

Keywords: Adaptation strategies, Climate change, Economic-hydrological model, Halil-Rud river basin